

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Lea Jambrečić

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. Prof. dr.sc. Jerolim Andrić

Studentica:

Lea Jambrečić

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom.

Zahvaljujem se mentoru, Izv. Prof. dr. sc. Jerolimu Andriću i Doc. dr. sc. Peri Prebegu na posvećenom vremenu, uloženom trudu, strpljenju i pruženoj pomoći tijekom izrade ovog rada.

Posebno se zahvaljujem i roditeljima bez čije pomoći ovo ne bi bilo ostvarivo.

Lea Jambrečić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Lea Jambrečić Mat. br.: 0035173902

Naslov rada na hrvatskom jeziku: VIŠECILJNA OPTIMIZACIJA KONSTRUKCIJE TANKERA ZA PRIJEVOZ NAFTE
Naslov rada na engleskom jeziku: MULTI-OBJECTIVE STRUCTURAL OPTIMIZATION OF AN OIL TANKER

Opis zadatka:

U okviru rada potrebno je provesti višeciljnu optimizaciju konstrukcije glavnog rebra tankera za prijevoz nafte s ciljem minimizacije mase, maksimizacije graničnog momenta u neoštećenom i oštećenom stanju. Pri tome konstrukcija glavnog rebra mora zadovoljiti važeće zahtjeve propisane harmoniziranim zajedničkim pravilima za projektiranje konstrukcije brodova za prijevoz rasutog tereta i tankera za prijevoz nafte Međunarodnog udruženja klasifikacijskih društava (IACS CSR BC & OT).

Zadatak obuhvaća:

- Upoznavanje s harmoniziranim pravilima IACS CSR BC & OT za projektiranje konstrukcijskih elemenata glavnog rebra tankera.
- Definiranje topoloških, geometrijskih i dimenzijskih varijabli konstrukcije glavnog rebra.
- Izradu odgovarajućeg broja topološko/geometrijskih različitih varijanti modela konstrukcije glavnog rebra trupa tankera primjenom programa MARS 2000.
- Pripremu optimizacijskog modela (ciljevi, varijable, ograničenja) u programu DEMAK koji je povezan s programom MARS 2000 putem ulazno-izlaznih datoteka.
- Provođenje višeciljne optimizacije korištenjem programa DEMAK, generiranje Pareto fronte te analizu rezultata.
- Usporedbu nekoliko preferiranih varijanti konstrukcije tankera odabranih s Pareto fronte pri čemu je potrebno obrazložiti koji kriteriji/ograničenja najznačajnije utječu na definiranje optimalnih strukturnih dimenzija pojedine projektne varijante.

Zadatak zadan:

11. svibnja 2017.

Rok predaje rada:

13. srpnja 2017.

Predviđeni datumi obrane:

19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Jerolim Andrić

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS VARIJABLA, KRATICA I OZNAKA	VI
SAŽETAK	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
2. OSNOVE PROJEKTIRANJA BRODSKE KONSTRUKCIJE	3
2.1. Granična čvrstoća	4
2.2. Parametar podobnosti konstrukcije	6
3. OSNOVE OPTIMIZACIJSKOG PROBLEMA.....	7
3.1. Definiranje projektnog problema	7
3.2. Podjela optimizacijskog problema [6]	9
3.2.1 Višeciljna optimizacija i koncept nedominiranosti [4]	10
3.3. Optimizacijske metode	11
3.3.1. Optimizacija rojem čestica, Particle swarm optimization (PSO)	12
3.3.1.1. Prilagodba optimizacije rojem čestica za rad s višeciljnim problemima	14
3.3.1.2. Prilagodba algoritma za rad s ograničenjima [2].....	15
4. MODEL GLAVNOG REBRA TANKERA.....	16
4.1. MARS model	16
4.2. Različiti topološko/ geometrijski modeli.....	18
4.3. Ulazni podaci	19
4.3.1. Promjena varijabla.....	21
4.4. Opis kriterija podobnosti.....	29

4.4.1. Kriteriji podobnosti vezani za limove.....	29
4.4.2. Kriteriji podobnosti vezani za uzdužnjake	30
4.5. Izlazni podaci	31
4.6. Određivanje mase konstrukcije	33
4.7. Optimizacija glavnog rebra.....	35
4.7.1. Definicija optimizacijskog problema.....	35
4.7.2. Projektne varijable	36
4.7.3. Projektna ograničenja.....	43
5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA.....	45
5.1. Pareto fronta	45
5.2. Analiza odabranih projekata s Pareto fronte	47
5.2.1. Projekt D1.....	47
5.2.2. Projekt D2.....	50
5.3. Usporedba odabranih projekta sa Pareto fronte	52
6. ZAKLJUČAK.....	53
LITERATURA	54

POPIS SLIKA

Slika 1. Definiranost projekta i fleksibilnost rješenja [4]	3
Slika 2. Krivulja ovisnosti momenta savijanja o zakrivljenosti trupa [5]	6
Slika 3. Podjela optimizacijskog problema [6]	9
Slika 4. Prikaz koncepta nedominiranosti [6]	11
Slika 5. Podjela optimizacijskih metoda [6]	12
Slika 6. Dijagram toka osnovnog PSO algoritma [2]	13
Slika 7. Osnovni podaci o brodu u programu MARS2000	17
Slika 8. Prikaz glavnog rebra u programu MARS2000	18
Slika 9. Varijante sekcija za određeni razmak	20
Slika 10. Varijante modela sa različitim brojem proveza	21
Slika 11. Prikaz grupa podataka vezane za broj i naziv sekcije	22
Slika 12. Prikaz grupe podataka vezane za limove	23
Slika 13. Prikaz sekcije sa maksimalnim brojem panela i lima	24
Slika 14. Prikaz grupe podataka vezane za dimenzije uzdužnjaka	25
Slika 15. Prikaz grupe podataka vezane za razmak uzdužnjaka	26
Slika 16. Vrijednosti vezane uz limove	29
Slika 17. Vrijednosti vezane uz uzdužnjake	30
Slika 18. Prikaz izlaznih podataka za limove	31
Slika 19. Prikaz izlaznih podataka za uzdužnjake	32
Slika 20. Skica povezanosti programa MARS2000 sa programom DeMak	35
Slika 21. Optimizacijska kontrolna ploča programa DeMak	36
Slika 22. Prikaz projektne varijable- debljina lima u programu DeMak	38
Slika 23. Definiranje panela i limova u programu MARS2000	39
Slika 24. Definiranje panela i grupa uzdužnjaka u programu MARS2000	41
Slika 25. Prikaz projektnih ograničenja u programu DeMak	43
Slika 26. 2D Pareto fronta nedominiranih rješenja	45
Slika 27. 3D prikaz nedominiranih rješenja	46
Slika 28. Prikaz debljina limova projekta D1	48
Slika 29. Prikaz kriterija granične čvrstoće projekta D1	48
Slika 30. Prikaz kriterija izvijanja limova projekta D1	49
Slika 31. Prikaz kriterija zamora uzdužnjaka projekta D1	49
Slika 32. Prikaz debljina limova projekta D2	50

Slika 33. Prikaz kriterija granične čvrstoće projekta D2	51
Slika 34. Prikaz kriterija izvijanja limova projekta D2	51
Slika 35. Prikaz kriterija zamora uzdužnjaka projekta D2	52

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovni podaci o brodu	16
Tablica 2. Karakteristike početnog modela	17
Tablica 3. Kombinacije geometrijsko/ topoloških karakteristika	19
Tablica 4. Prikaz širina panela	27
Tablica 5. Dimenzije i masa poprečnih elementa konstrukcije.....	33
Tablica 6. Dimenzije i masa vertikalnih ukrepa	34
Tablica 7. Ukupna masa poprečne strukture okvira.....	34
Tablica 8. Prikaz minimalnih i maksimalnih debljina limova	37
Tablica 9. Prikaz minimalnih i maksimalnih dimenzija uzdužnjaka	37
Tablica 10. Prikaz koraka pojedine dimenzije uzdužnjaka.....	38
Tablica 11. Poveznica naziva panela i limova između programa MARS2000 i DeMak	40
Tablica 12. Poveznica naziva panela i uzdužnjaka između programa MARS2000 i DeMak	42
Tablica 13. Poveznica naziva ograničenja za limove između programa MARS2000 i programa DeMak.....	43
Tablica 14. Poveznica naziva ograničenja za uzdužnjake između programa MARS2000 i programa DeMak.....	44
Tablica 15. Minimalne i maksimalne vrijednosti projekta sa pareto fronte prikazane na slici 25.....	46

POPIS VARIJABLA, KRATICA I OZNAKA

a	- projektni atributi
C	- izdržljivost strukturnog elementa, N/mm^2
c	- kriteriji projekta
D	- zahtjev (opterećenje) na strukturni element, N/mm^2
d	- projektni parametri (deskriptori)
f	- funkcija cilja
g	- parametar podobnosti
g	- ograničenja nejednakosti
h	- ograničenja jednakosti
M	- vertikalni moment savijanja, kNm
M_u	- granični moment savijanja trupa broda, kNm
M_{SW-U}	- momenta savijanja na mirnoj vodi, kNm
M_{WV}	- moment savijanja na valovima, kNm
x	- projektne varijable
y	- projektni ciljevi
γ	- faktor sigurnosti
BV	- Bureau Veritas - klasifikacijsko društvo
DeMak	- <i>Decision Maker</i> - sintetski blok sustava OCTOPUS
ISSC	- International Ship and Offshore Structures Congress
IACS	- International Association of Classification Societies
OCTOPUS	- Sustav za konceptualno projektiranje brodskih konstrukcija razvijen na FSB-u

SAŽETAK

U ovom radu provedena je optimizacija konstrukcije glavnog rebra tankera za prijevoz nafte. Ona obuhvaća definiranje projektnog problema i postupak provođenja višeciljne optimizacije konstrukcije glavnog rebra tankera s ciljem minimizacije mase i maksimizacije graničnog momenta.

Konstrukcija glavnog rebra mora zadovoljiti važeće zahtjeve propisane harmoniziranim zajedničkim pravilima za projektiranje konstrukcije brodova za prijevoz rasutog tereta i tankera za prijevoz nafte (IACS CRS BC & OT). Definirane su topološke, geometrijske i dimenzijske varijable konstrukcije glavnog rebra nakon čega se pristupilo izradi modela u programu MARS2000, v2.9g (Bureau Veritas). Ukupno je izrađeno 27 modela različitih topološko/ geometrijskih varijanti.

Za provedbu višeciljne optimizacije bilo je potrebno napraviti pripremu optimizacijskog modela (ciljevi, varijable i ograničenja) u programu DeMak koji je povezan s programom MARS2000 putem ulazno-izlaznih datoteka.

Višeciljnom optimizacijom generirana je Pareto fronta te je izvršena analiza dobivenih rezultata.

Ključne riječi: višeciljna optimizacija, granična čvrstoća, minimizacija mase, Pareto fronta

SUMMARY

Through this thesis structural optimization of midship section of an oil tanker has been performed. The overall process includes the definition of the project's problem, as well as the procedure of performing a multi-objective optimization method of constructing the main oil tanker's web frame with the goal of minimizing weight and maximizing ultimate strength.

The construction of the main web frame must fulfill applicable requirements prescribed by the harmonized requirements found in the Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers (IACS CRS BS & OT). Furthermore, topological, geometrical and dimensional structural variables of constructing the main web frame were defined, after which a model was created with the help of the MARS2000 c2.9g (Bureau Veritas) programme. In total, in the thesis, there are twenty seven models of distinct topological – geometrical variables.

In regard to the multi-objective optimization method, it was necessary to create preparations of the optimization model (objectives, variables and strengths) with the help of the DeMak programme, associated with the MARS2000 programme through the input – output of files.

By using the multi-objective optimization method, a Pareto front was generated and an analysis of achieved results was conducted.

Key words: multi-objective optimization, ultimate strength, weight minimization, Pareto front

1. UVOD

Projektiranje složenih brodskih konstrukcija predstavlja kompleksan i nelinearan problem koji zahtijeva primjenu novih tehnologija. Primjena optimizacijskih postupaka je nužna zbog potrebe projektanta da u relativno kratkom vremenskom periodu generiraju različite projektne varijante. Bitne odluke, poput raspodjele glavnih podstruktura i nosivih elemenata se moraju donijeti u ranoj fazi projektiranja kada projektant raspolaže sa ograničenom količinom parametra. Te odluke su vrlo bitne jer o njima ovise ukupni troškovi proizvoda.

Razvojem sofisticiranih projektnih alata bitno se podiže kvaliteta i ubrzava se proces projektiranja. Da bi bili konkurentni na svjetskom tržištu projektni uredi/ brodogradilišta moraju imati takve alate s kojima će proizvesti optimalni projekt u ranoj projektnoj fazi. Danas je na brodograđevnom tržištu moguće kupiti samo alate za analizu konstrukcije, razvijene većim dijelom od strane klasifikacijskih društava. Alate/ programe za optimizaciju konstrukcije, osim sustava MAESTRO nije moguće kupiti i oni se razvijaju individualno od strane brodogradilišta i njihovih partnera [2].

U ovom radu razmatrati će se utjecaj različitih varijabli na čvrstoću brodske konstrukcije tankera za prijevoz nafte, tj. pokušati će se pomoću višeciljne optimizacije doći do optimalnog projekta. Utjecaj koji imaju različite kombinacije, npr. debljina lima sa razmakom okvira i brojem proveza u dvoboku, se ne istražuje u dovoljnoj mjeri često zbog nedostatka vremena u ranim fazama projektiranja. Ovdje će biti pokazano koliko bi bilo isplativo razviti računalni sustav, *software* kojim bi se u kratkom vremenskom periodu mogle ispitati razne varijante konstrukcija s ciljem dobivanja optimalnog projekta.

U *uvodnom poglavlju* je dan kratak osvrt na razmatrani problem te je dan pregled rada po poglavljima.

U *drugom poglavlju* je dan kratak uvid u problem projektiranja brodske konstrukcije, kao i prikaz projektnog kriterija vezan za graničnu čvrstoću konstrukcije prema harmoniziranim Pravilima (IACS CRS BC & OT) [1].

U *trećem poglavlju* je dana definicija projektnog problema i podjela optimizacijskog problema. Ukratko je opisana globalna podjela optimizacijskih metoda, objašnjen je

koncept nedominiranosti te je pobliže opisan optimizacijski algoritam korišten u ovom radu.

U *četvrtom poglavlju* prikazan je model glavnog rebra tankera te promjene dimenzija konstrukcijskih elemenata unutar programa MARS2000.

U *petom poglavlju* provedena je analiza rezultata projekta dobivenih na Pareto fronti.

U *šetom poglavlju* dan je zaključak na temelju dobivenih rezultata.

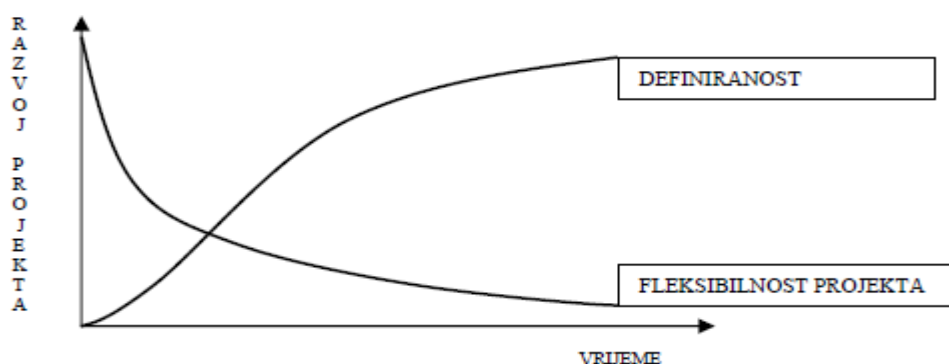
2. OSNOVE PROJEKTIRANJA BRODSKE KONSTRUKCIJE

Složene tankostijene konstrukcije poput broda traže primjenu novih tehnologija kako u gradnji i opremanju tako i u procesu projektiranja. Da bi bili konkurentni na svjetskom tržištu proizvođači/projektni uredi moraju moći brzo generirati različite projektne varijante i proizvesti kvalitetne projekte u ranoj projektnoj fazi. Pri tome je potrebno imati na umu da projektanti u ranim fazama projektiranja raspolažu vrlo ograničenom količinom deskriptora (parametara) projekta koji se tijekom procesa projektiranja povećava. Istovremeno, upravo u ranim fazama projektiranja donosi se najveći broj odluka vezanih za ukupne, cjeloživotne troškove proizvoda [2].

Brodске konstrukcije predstavljaju velike i složene sustave te je njihovo projektiranje podijeljeno u projektne faze. Za takve sustave usvojena su dva osnovna nivoa projekta od strane *International Ship and Offshore Structures Congress (ISSC)*, kao vodećeg stručnog autoriteta na tom području [3]:

1. Osnovni projekt
 - a) Konceptualna faza projektiranja
 - b) Preliminarna faza projektiranja
 - c) Inicijalna faza projektiranja
2. Detaljna razrada projekta

Proces projektiranja s obzirom na vrijeme i definiranost projekta shematski je prikazan na slici 1 [4]. Kako vrijeme prolazi definiranost projekta raste, tj. sve je više projektnih varijabli definirano/fiksirano, dok se fleksibilnost izbora vrijednosti projektnih varijabli i mogućih rješenja sužava.



Slika 1. Definiranost projekta i fleksibilnost rješenja [4]

Konceptualna faza kao početna faza odlikuje se kratkoćom vremena, ali i većom fleksibilnosti u izboru rješenja. Nju karakterizira definiranje ciljeva i ograničenja projekta. Ta projektna faza vrlo je intenzivna po broju odluka koje dalje u velikoj mjeri definiraju projekt, a koje je potrebno donijeti u relativno kratkom vremenu od strane vrlo male grupe ljudi. Težina konstrukcije i tip materijala u ovoj fazi je osnovni podatak koji se traži kako bi se na vrijeme definirala narudžba materijala. Projektant konstrukcije nastoji obraditi niz strukturnih varijanti glavnog rebra i izabrati optimalnu konstrukciju na osnovi postavljenih ograničenja/kriterija i definiranog cilja (npr. minimalne težine/cijene) [4].

Brod mora biti projektiran tako da njegova konstrukcija izdrži sve slučajeve opterećenja u kojima će se u toku svoje eksploatacije naći. Klasifikacijska društva određuju najveća dopuštena (projektna) opterećenja za koja se brod projektira. Kroz ovaj rad korištena su harmonizirana zajednička pravila za projektiranje konstrukcije brodova za prijevoz rasutog tereta i tankera za prijevoz nafte (IACS CRS BC & OT) [1].

2.1. Granična čvrstoća

Uzdužna čvrstoća je najvažniji aspekt čvrstoće broda, zbog toga se za većinu tipova brodova često naziva i primarna čvrstoća broda. Proračun uzdužne čvrstoće broda u standardnom projektnom postupku svodi se na određivanje projektnog vertikalnog momenta savijanja i dimenzioniranje strukturnih elemenata koji mogu podnijeti djelovanje takvog momenta. Dimenzioniranje konstrukcijskih elemenata provodi se prema harmoniziranim IACS Pravilima za tankere i brodove za rasuti teret, tako što se granični momenta savijanja uzima se kao mjera uzdužne granične čvrstoće trupa. Pojam uzdužne granične čvrstoće trupa može se definirati kao stanje naprezanja i deformacije na razini trupa koje odgovara maksimalnom opterećenju (granični moment savijanja) koje struktura može izdržati. Svako daljnje povećanje momenta savijanja dovodi do kolapsa trupa broda [4].

Vertikalni granični moment savijanja trupa mora zadovoljiti sljedeći kriterij [1]:

$$M \leq \frac{M_U}{\gamma_R} \quad (2.1)$$

gdje je:

M – ekstremna vrijednost vertikalnog momenta savijanja;

M_U – granični moment savijanja broskog trupa, kao mjera maksimalne savojne izdržljivosti trupa;

γ_R – parcijalni faktor sigurnosti za granični moment savijanja (pokriva nesigurnost podataka u svezi modeliranja, materijala, strukturnih dimenzija i primijenjene proračunske metode).

Vertikalni moment savijanja definiran je sljedećom jednadžbom [1]:

$$M = \gamma_S \cdot M_{SW-U} + \gamma_W \cdot M_{WV} \quad (2.2)$$

gdje je:

M_{SW-U} – ekstremna vrijednost momenta savijanja na mirnoj vodi;

M_{WV} – ekstremna vrijednost valnog momenta savijanja;

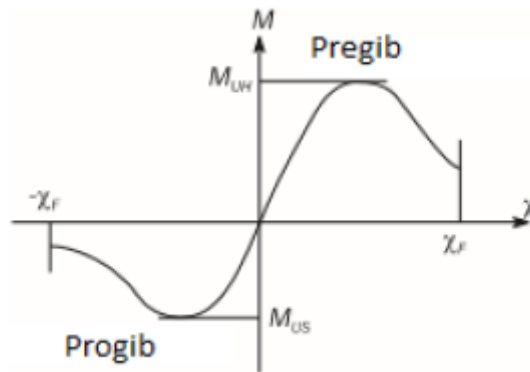
γ_S – parcijalni faktor sigurnosti za moment savijanja na mirnoj vodi;

γ_W – parcijalni faktor sigurnosti za valni moment savijanja (pokriva nesigurnosti proračuna valnih opterećenja).

Projektni kriterij vezan za graničnu čvrstoću konstrukcije prema Pravilima [1] mora zadovoljiti sljedeće:

$$M\gamma_S \cdot M_S + \gamma_W \cdot M_W \leq \frac{M_U}{\gamma_R} \quad (2.3)$$

Jedinstvenim propisima uzdužne čvrstoće IACS-a, klasifikacijska društva uključuju i inkremetalno-iterativne postupke analize graničnog momenta. Inkremetalni se dio postupka očituje u postupnom povećavanju zamišljene zakrivljenosti trupa broda, χ . Za svaki inkrement računaju se deformacije uzrokovane narinutom zakrivljenošću χ_i , odgovarajuća naprezanja i uzdužne sile koje djeluju na presjek. Iterativnim se putem u svakom koraku postupka dobiva novi položaj neutralne osi, dakle ukoliko nije zadovoljen uvjet ravnoteže procedura iterativno pomiče neutralnu liniju sve dok se ne postigne ravnoteža presjeka. Postupak se ponavlja sve dok zakrivljenost, χ_i ne postigne maksimalnu vrijednost, χ_{max} [5]. Rezultat postupka je krivulja momenta savijanja u ovisnosti o zakrivljenosti trupa broda, $M - \chi$ dijagram prikazan na slici 2.



Slika 2. Krivulja ovisnosti momenta savijanja o zakrivljenosti trupa [5]

Na slici 2 se vidi pregibno i progibno stanje konstrukcije. Točka u kojoj promjena savojne krutosti mijenja predznak interpretira se kao granična nosivost trupa, a odgovarajući moment naziva se graničnim momentom savijanja.

2.2. Parametar podobnosti konstrukcije

Konstrukcija će biti podobna ukoliko je projektno ograničenje zadovoljeno. Parametar podobnosti, g nam daje informaciju o odnosu odziva konstrukcije i dopuštenih veličina za dano ograničenje. Definira odnos vrijednosti izdržljivosti, C (*Capability*) i zahtjeva, D (*Demand*) neke veličine čiju vrijednost treba odrediti. Definira se prema idućoj formuli:

$$g = \frac{C-D}{C+D} \quad (2.4)$$

Ovako definiran parametar podobnosti poprima vrijednost $-1 \leq g \leq 1$. Granični slučajevi su kada $g = 1$, ako je $D = 0$; $g = -1$, ako je $C = 0$. Podobnost je zadovoljena kada je parametar u području pozitivnih vrijednosti $g \geq 0$.

3. OSNOVE OPTIMIZACIJSKOG PROBLEMA

Projektiranje složenih tankostijenih konstrukcija predstavlja složen, nelinearan problem koji je teško izraziti analitički, te je zbog toga većina optimizacijskih metoda numeričko-iterativnog tipa te zahtijeva uporabu računala. Optimizacijski postupak uvodi sistematsku metodologiju za određivanje vrijednosti projektnih varijabli koji maksimiziraju ili minimiziraju zadanu mjeru kvalitete (projekta) i istovremeno zadovoljavaju projektna ograničenja [2].

3.1. Definiranje projektnog problema

Matematička formulacija projektnog problema naziva se *projektni model*. Za njegovu formulaciju potrebno je definirati osnovne komponente *projektnog problema*. Terminologija koja se primjenjuje u definiranju komponenata projektnog problema dobro je poznata i usvojena [4]. Komponente projektnog problema dane su kako slijedi [6]:

Projektni deskriptori (parametri), *design descriptors (parameters)* d

Projektni deskriptori su svi ulazni podaci koji su potrebni kako bi se definirao matematički model ili neka primjena u tehnici.

- Projektne varijable, *design variables* x

Projektne varijable su podskup projektnih deskriptora. Podložne su izmjenama od strane projektanta i lako su promijenjive tokom projektnog/ optimizacijskog procesa. Veza između projektnih deskriptora i projektnih varijabla može se izraziti kao:

$$d = \{ x, d^- \}$$

gdje su d^- svi oni projektni deskriptori koji se ne mijenjaju tokom projektnog procesa, konstantni su.

Kriteriji projekta, *design criteria* c

Kriteriji projekta su svi ulazni i izlazni podaci matematičkog modela ili neke primjene u tehnici koji su bitni projektantu u donošenju odluka tokom projektnog procesa.

- Projektna ograničenja, *design constraints g*

Projektna ograničenja su podskup projektnih kriterija koji mora zadovoljiti propisane uvjete i može biti zapisan kao jedan od dva oblika:

$g \geq 0$ – ograničenja nejednakosti

$g = 0$ – ograničenja jednakosti

- Projektni atributi, *design attributes a*

Projektni atributi su podskup projektnih kriterija koji pruža mjeru kvalitete projekta (npr. cijena, sigurnost).

- Projektni ciljevi, *design objectives y*

Projektni ciljevi su projektni atributi sa definiranim smjerom poboljšanja kvalitete projekta (npr. minimizacija cijene, maksimizacija sigurnosti).

Projektni problem pojednostavljeno se definira na način da se definiraju projektne varijable, potom se definira cilj i ograničenja te ih se izrazi kao funkcije projektnih varijabli. Na kraju se minimizira ili maksimizira cilj projektnog postupka na način da se rješenje nalazi unutar postavljenog skupa ograničenja [3]. Najčešće, projektni problem se definira izrazom [1]:

$$\begin{aligned} & \min f(x_i) \\ & x \in R^n : \quad h_j(x_i) = 0, \quad j = 1, \dots, n_h, \\ & \quad \quad g_k(x_i) \geq 0, \quad k = 1, \dots, n_g, \\ & \quad \quad x_{il} \leq x_i \leq x_{iu} \end{aligned} \tag{3.1}$$

gdje su:

x – projektne varijable

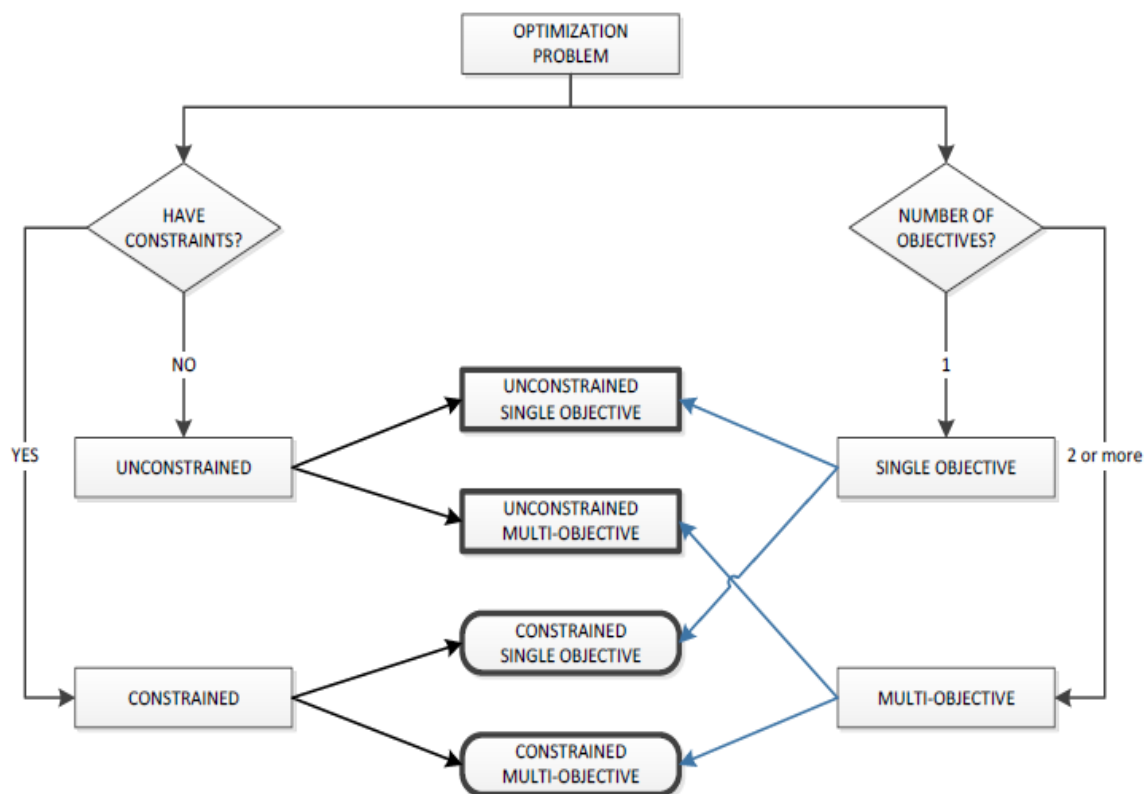
f – funkcija cilja

h – ograničenja jednakosti

g – ograničenja nejednakosti

3.2. Podjela optimizacijskog problema [6]

Postoje mnoge podjele optimizacijskog problema, ali dvije glavne se odnose na postojanje (ili nepostojanje) projektnih ograničenja i na broj projektnih ciljeva. Spomenuta podjela prikazana je na slici 3.



Slika 3. Podjela optimizacijskog problema [6]




Iako problemi koji se javljaju u tehnici uvijek imaju ograničenja, optimizacijske metode za probleme koji ne uključuju ograničenja su i dalje od velike važnosti zato jer je moguće upotrijebiti općenite pristupe za uključivanje ograničenja. Te metode su također interesantne zbog značajnog istraživačkog rada koji je napravljen u tom području. Problemi u tehnici najčešće imaju nekoliko projektnih ciljeva, no budući da je rješavanje višeciljnog problema kompleksan postupak, česta je praksa da se problem reducira na jedan najvažniji cilj ili na neki složen cilj koji u sebi objedinjuje nekoliko njih u jednu funkciju cilja. Kada je moguće, optimizacijski problem bi se trebao rješavati kao višeciljni problem. Rezultat višeciljne optimizacije je skup nedominiranih rješenja ili Pareto fronta koja omogućava bolji uvid u projektni

problem, nego što je to moguće kod optimizacije sa jednim ciljom, koja ima samo jedno rješenje. Rješavanje optimizacijskog problema na način da se problem gleda kao višeciljni je najčešće moguće u konceptualnoj fazi projektiranja jer je matematički model u toj fazi relativno jednostavan, a broj projektnih varijabli je nizak.


3.2.1 Višeciljna optimizacija i koncept nedominiranosti [4]

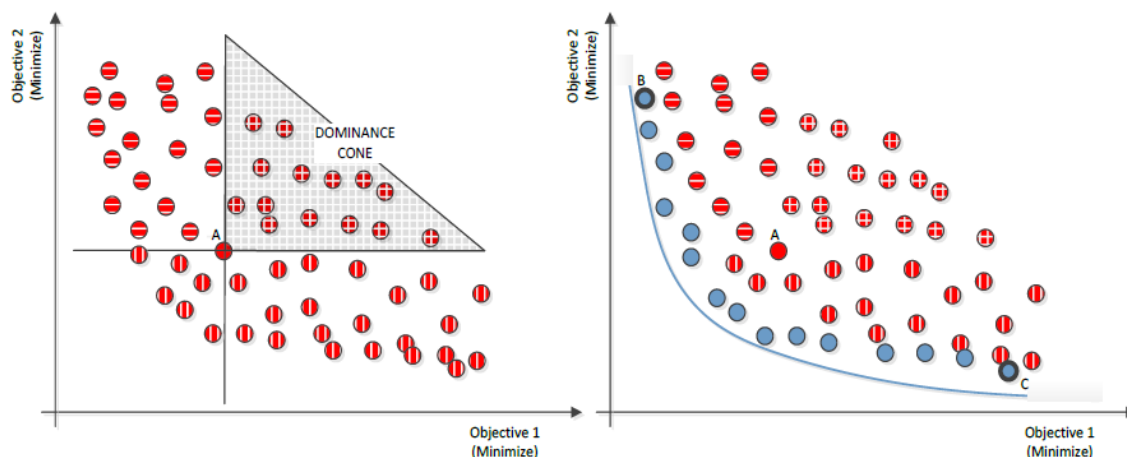
Najjednostavniji način prikaza koncepta nedominiranosti je opis povezanosti jednog rješenja i svih ostalih dobivenih u primjeru koji slijedi. Radi se o optimizacijskom problemu sa definirana dva cilja koje treba minimalizirati i koji ne sadrži ograničenja.

Uspoređujući rješenje A (označeno  na slici 4a) sa svim ostalim dobivenim rješenjima moguće je zaključiti:

- Rješenje A je bolje od svih rješenja koja su iznad njega (označeno ) , gledajući cilj jedan, *Objective 1*
- Rješenje A je bolje od svih rješenja koja su sa njegove desne strane (označeno ) , gledajući cilj dva, *Objective 2*
- Rješenje A je bolje od svih rješenja koja se nalaze sa njegove desne strane u gornjem kutu (označeno ). Može se reći da rješenje A dominira nad njima, ona se nalaze u njegovom konusu dominiranosti pa ih zovemo dominiranim rješenjima.

Kada se opisana usporedba provede za sva dobivena rješenja, svako rješenje će definirati svoj konus dominiranosti. Samo ona rješenja koja se ne nalaze u konusu dominiranosti drugih rješenja su interesantna za proces odlučivanja. Ta rješenja se zovu Pareto optimalna rješenja, nedominirana rješenja ili zajedno Pareto fronta

(označeno  na slici 4b). Zovu se nedominirana jer niti jedno rješenje ne dominira nad njima, odnosno ne nalaze se u konusu dominiranosti niti jednog dobivenog rješenja. Plava linija na slici 4b prikazuje teoretsku Pareto frontu. Važno je primijetiti da je rješenje B najbolje gledajući sa strane cilja jedan, dok je rješenje C najbolje sa stajališta cilja dva.



Slika 4. Prikaz koncepta nedominiranosti [6]

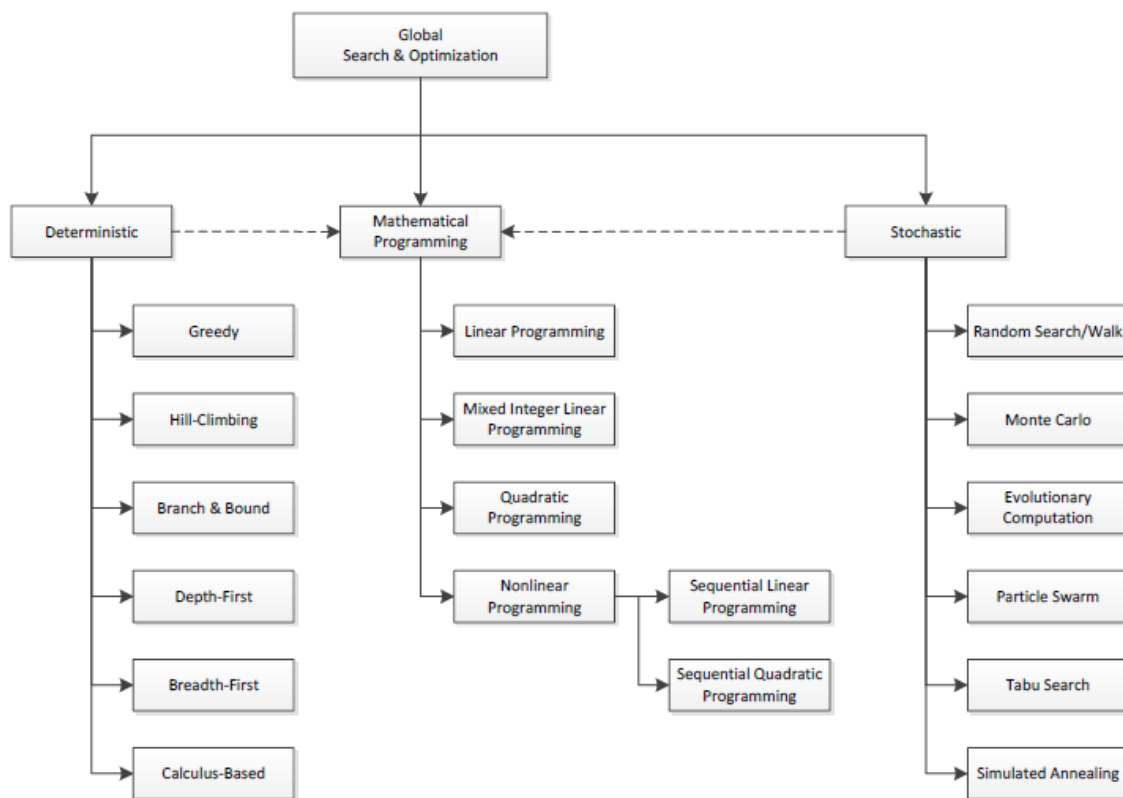
Kako bi se pojednostavnila definicija grafički prikazana na slici 4 kao alternativa dana je iduća definicija:

- Rješenje je nedominirano ako je bolje od svih ostalih dobivenih rješenja barem po jednom cilju.

3.3. Optimizacijske metode

Optimizacijske metode mogu biti svrstane u tri kategorije: determinističke, stohastičke i metode matematičkog programiranja, slika 5. Determinističke metode se uspješno koriste u rješavanju mnogih problema jer rješavaju problem donošenjem egzaktnih odluka u svakom koraku algoritma, no kako se višeciljna optimizacija koristi pri rješavanju problema koji su nepravilni, ne kontinuirani te uključuju velik broj projektnih varijabla i atributa ta je metoda neprikladna. Stohastički pristup optimizaciji je razvijen kao alternativni pristup za rješavanje problema koje deterministički pristup nije mogao riješiti. Slučajni algoritmi istražuju prostor rješenja s većom ili manjom dozom stohastičnosti sve dok ne pronađu prihvatljivo rješenje. Neke od stohastičkih metoda su se pokazale uspješnima u pronalasku globalnog odziva, no većina njih ipak ne može garantirati pronalazak optimuma. Generalno, one nude prihvatljiva rješenja za širok spektar optimizacijskih problema do kojih determinističke metode nisu mogle doći [6]. Metode matematičkog programiranja su jedne od najraširenijih tehnika traženja rješenja. Za većinu metoda potreban je gradijent funkcije cilja i

ograničenja, ili pak veliki broj koraka kod procesa traženja. Kod ovih metoda može se, zbog prirode algoritma, pojaviti problem pronalaženja globalnog optimuma u slučaju da funkcija nije monotona te da postoji više lokalnih minimuma. Najbolju primjenu imaju kod traženja rješenja za jednociljni problem.

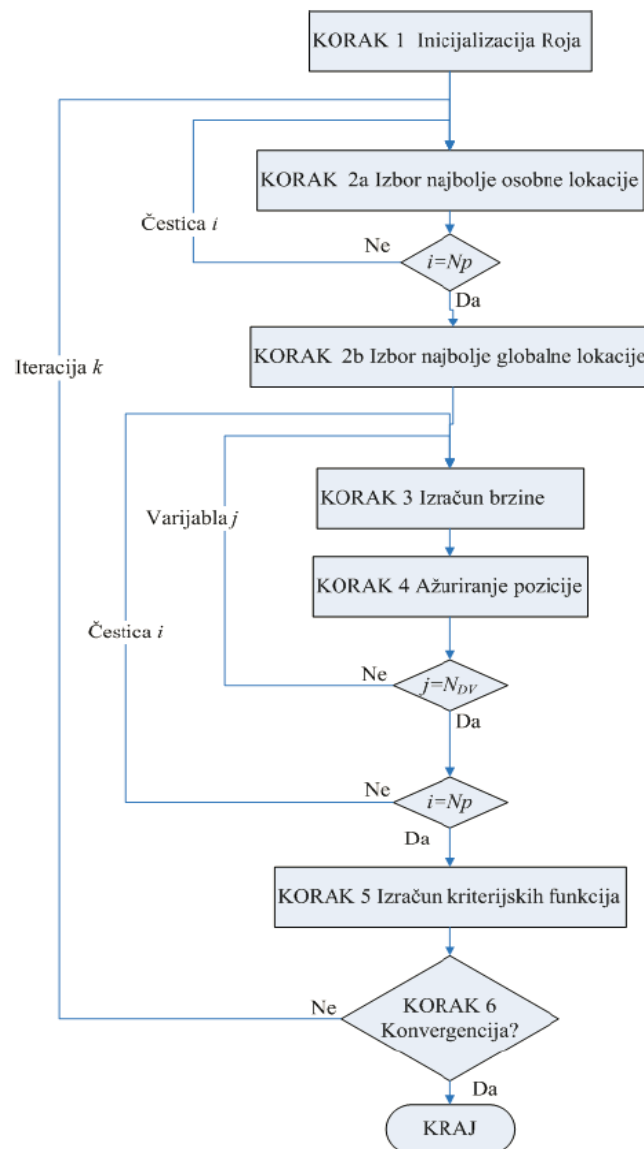


Slika 5. Podjela optimizacijskih metoda [6]

3.3.1. Optimizacija rojem čestica, Particle swarm optimization (PSO)

U nastavku je dan opis optimizacijskog algoritma korištenog u radu, i to prvo osnovnog algoritma namijenjenog za jednociljnu optimizaciju bez ograničenja, a nakon toga proširenja za višeciljnu optimizaciju i rad s ograničenjima.

Osnovna ideja PSO algoritma prezentirana u [7] proizlazi iz činjenice da na kretanje (let) svake pojedinačne čestice u cijeloj populaciji (roju) kroz projektni i atributni prostor utječu najbolji projekti (lokacije) nađeni do trenutne iteracije od strane čestice kao i cijelog roja. Osnovni PSO algoritam možemo prikazati kroz 6 koraka, slika 6.



Slika 6. Dijagram toka osnovnog PSO algoritma [2]

Korak 1: Inicijalizacija roja

Nakon inicijalizacije roja čestice se obično nasumično rasporede po projektnom prostoru te se zatim svakoj čestici u odnosu na njezinu trenutnu lokaciju pridružuje mjera kvalitete koju zovemo dobrotom rješenja, *fitness*.

Korak 2:

Izbor najboljih vlastitih i globalnih vodiča potrebnih za izračun brzine u koraku 3. Potrebno je da svaka čestica izabere svoju vlastitu najbolju lokaciju pronađenu do

trenutne iteracije te isto tako odabere najbolju globalnu lokaciju pronađenu od strane cijelog roja do trenutne iteracije.

Korak 3: Izračun nove brzine za svaku česticu u roju.

Kretanjem čestice se upravlja pomoću brzine iz prethodnog koraka, vlastitim znanjem čestice - vlastita najbolja lokacija i globalnim znanjem roja - najbolja lokacija pronađena od strane cijelog roja.

Korak 4: Izračun novog položaja

Pomoću brzine čestice dobivene iz prethodnog koraka pronalazi se novi položaj čestice.

Korak 5: Izračun dobrote rješenja

Za novi položaj (lokaciju) vrši se izračun dobrote za svaku česticu.

Korak 6: Provjera konvergencije

Ukoliko je dostignut zadani broj iteracija ili zadovoljen kriterij konvergencije algoritam se zaustavlja, inače se ponavljaju koraci 2 do 6 sve dok se ne zadovolji jedan od uvjeta (broj iteracija odnosno kriterij konvergencije).

Gore opisani algoritam je predviđen za optimizacijske probleme bez ograničenja, ali postoje brojna proširenja algoritma koja omogućuju rad s ograničenjima.

3.3.1.1. Prilagodba optimizacije rojem čestica za rad s višeciljnim problemima

Gore opisani algoritam je predviđen za optimizacijske probleme bez ograničenja, ali postoje brojna proširenja algoritma koja omogućuju rad s ograničenjima.

Kod optimizacije jednociljnog projektnog problema PSO optimizacijskim algoritmom, postoji samo jedno optimalno rješenje te je izbor globalnog i lokalnog vodiča za svaku česticu jednostavan i očit. Izbor je jednostavan pošto svaka čestica ima samo jedan lokalni i globalni vodič. Prelaskom na višeciljnu optimizaciju javlja se novi problem, a to je skup nedominiranih rješenja koji se generira zbog višeciljnosti problema. Upravo zbog toga kod višeciljne PSO optimizacije izbor globalnog i lokalnog vodiča postaje mnogostruko kompliciran, tj. svaka čestica sada ima skup nedominiranih rješenja iz kojeg mora odabrati svog globalnog i lokalnog vodiča.

Unutar programskog sustava OCTOPUS Designer-a implementirana su tri MOPSO algoritma koja svaki na svoj specifičan način vrše odabir vodiča iz skupa nedominiranih rješenja, a to su: *Hypercube*, *Sigma* i MOCLPSO [8].

3.3.1.2. Prilagodba algoritma za rad s ograničenjima [2]

Kao što je moguće vidjeti u osnovnom algoritmu optimizacije rojem čestica, algoritam inicijalno ne uključuje način rada s ograničenjima. Isto tako niti jedan od tri navedena načina proširenja metode ne objašnjavaju na koji način bi metode trebale raditi ukoliko se definiraju ograničenja. Zbog toga je navedene algoritme bilo neophodno modificirati kako bi se omogućilo da finalna Pareto rješenja budu podobna, odnosno da svako Pareto rješenje zadovoljava sva postavljena ograničenja.

4. MODEL GLAVNOG REBRA TANKERA

4.1. MARS model

Glavno rebro je modelirano u programu MARS2000. To je računalni alat napravljen od strane klasifikacijskog društva Bureau Veritas i omogućava projektiranje uzdužnih konstrukcijskih elemenata (oplata, profili) prema IACS Pravilima na razini 2D poprečnog presjeka trupa. Pri izradi modela korišteni su podaci tankera za prijevoz nafte, nosivosti 112600 dwt. Izrađen je odgovarajući broj topološko/ geometrijskih različitih varijanti modela konstrukcije glavnog rebra. Program MARS2000 nakon pokretanja proračuna daje podatke o primarnoj čvrstoći konstrukcije, odnosno daje vrijednosti o uzdužnoj graničnoj čvrstoći modela, odnosno o graničnom momentu savijanja konstrukcije. Osim što globalno ispituje čvrstoću konstrukcije, ispituje ju i lokalno. Modeli su napravljeni sa svrhom dobivanja ulazno-izlaznih datoteka koje su poveznica optimizacijskog modela u programu DeMak s programom MARS2000. U Tablici 1 prikazane su glavne dimenzije spomenutog tankera.

Tablica 1. Osnovni podaci o brodu

Duljina preko svega [m]	247.24
Širina [m]	42
Visina [m]	21
Gaz [m]	15.6
Blok koeficijent	0.8445
Max. brzina u službi [čv]	15.95
Max. moment savijanja na mirnoj vodi u pregibu [kNm]	2745862
Max. moment savijanja na mirnoj vodi u progibu [kNm]	2079009

To su ujedno i prvi podaci koji se unose u program MARS2000. Na slici 7 prikazan je izbornik iz programa u kojem se vidi unos glavnih dimenzija. Nakon unošenja osnovnih dimenzija, momenta savijanja na mirnoj vodi, gaza, vrste materijala koja će se koristiti pri izradi modela glavnog rebra i pozicije okvirnog rebra pristupa se izradi glavnog rebra broda. Postupak modeliranja glavnog rebra u programu MARS2000 može se podijeliti u iduće korake: zadavanje čvorova, generiranje panela, definiranje limova na pojedinim panelima i definiranje grupe uzdužnjaka na pojedinim panelima. To naravno nisu svi koraci, ali se može reći da su osnovni za definiranje glavnog rebra.

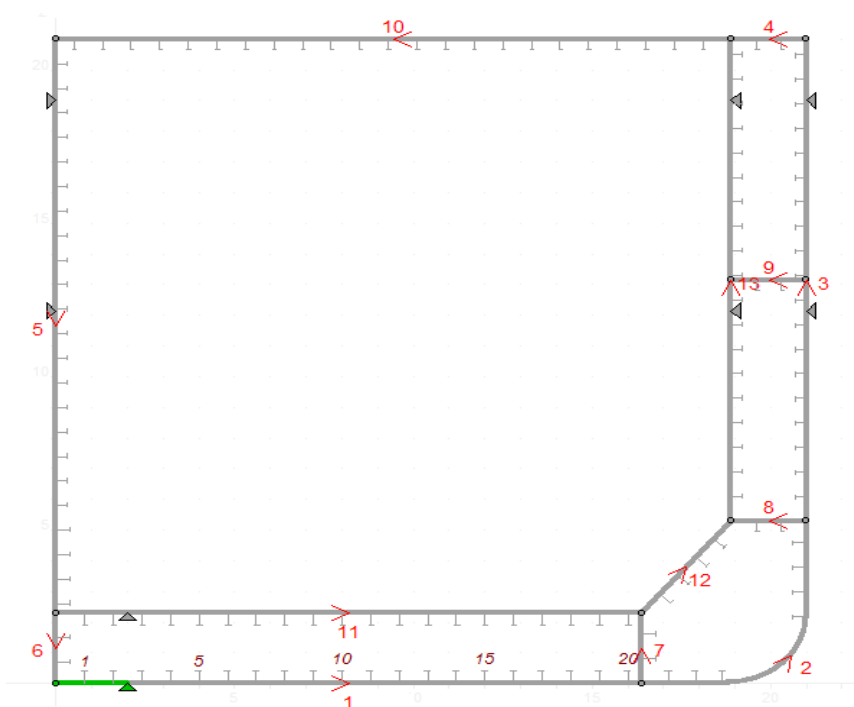
Slika 7. Osnovni podaci o brodu u programu MARS2000

Modelirano je glavno rebro idućih geometrijskih karakteristika, Tablica 2.

Tablica 2. Karakteristike početnog modela

Širina dvoboka [mm]	2100
Razmak okvira [mm]	3400
Broj proveza	1

Isto je prikazano i na slici 8. Kružići označuju definirane čvorove, crvene brojke označuju redni broj panela, a strelice smjer definiranja panela. Trokutići definiraju širinu lima na određenom panelu i na kraju prikazan je raspored ukrepa cijelog rebra.



Slika 8. Prikaz glavnog rebra u programu MARS2000

Nakon definiranja geometrije i dimenzija glavnog rebra, program MARS2000 radi proračun kojim provjerava da li su aktualne dimenzije u skladu sa zahtjevima harmoniziranih Pravila (CSR for Bulk Carriers and Oil Tankers). Izlazni rezultati su dani u vidu kriterija globalne čvrstoće (popuštanje i granična čvrstoća), lokalnih dimenzija oplata, uzdužnih i poprečnih ukrepa (minimum, popuštanje i kriterij izvijanja) i proračuna zamora dijelova konstrukcije (spojevi između uzdužnih ukrepa i nosača primarne strukture). Prvi model je napravljen tako da su zadovoljeni svi parametri podobnosti i od njega se kretalo sa daljnjim varijacijama.

4.2. Različiti topološko/ geometrijski modeli

Ukupno je napravljeno je 27 modela sa različitim geometrijsko/ topološkim karakteristikama. Razmatrana su tri razmaka okvira, 3400 mm, 3900 mm i 4500 mm. Konkretno, za svaki razmak okvira varirana širina dvoboka i broj proveza. U Tablici 3 su prikazane karakteristike koje su se varirale za sve modele. Radi se o širini dvoboka, razmaku okvira i broju proveza.

Tablica 3. Kombinacije geometrijsko/ topoloških karakteristika

R. broj	Model	Širina dvoboka [mm]	Razmak okvira [mm]	Broj proveza u dvoboku
1	D20-3.4-1	2000	3400	1
2	D21-3.4-1	2100	3400	1
3	D22-3.4-1	2200	3400	1
4	D20-3.4-2	2000	3400	2
5	D21-3.4-2	2100	3400	2
6	D22-3.4-2	2200	3400	2
7	D20-3.4-3	2000	3400	3
8	D21-3.4-3	2100	3400	3
9	D22-3.4-3	2200	3400	3
10	D20-3.9-1	2000	3900	1
11	D21-3.9-1	2100	3900	1
12	D22-3.9-1	2200	3900	1
13	D20-3.9-2	2000	3900	2
14	D21-3.9-2	2100	3900	2
15	D22-3.9-2	2200	3900	2
16	D20-3.9-3	2000	3900	3
17	D21-3.9-3	2100	3900	3
18	D22-3.9-3	2200	3900	3
19	D20-4.5-1	2000	4500	1
20	D21-4.5-1	2100	4500	1
21	D22-4.5-1	2200	4500	1
22	D20-4.5-2	2000	4500	2
23	D21-4.5-2	2100	4500	2
24	D22-4.5-2	2200	4500	2
25	D20-4.5-3	2000	4500	3
26	D21-4.5-3	2100	4500	3
27	D22-4.5-3	2200	4500	3

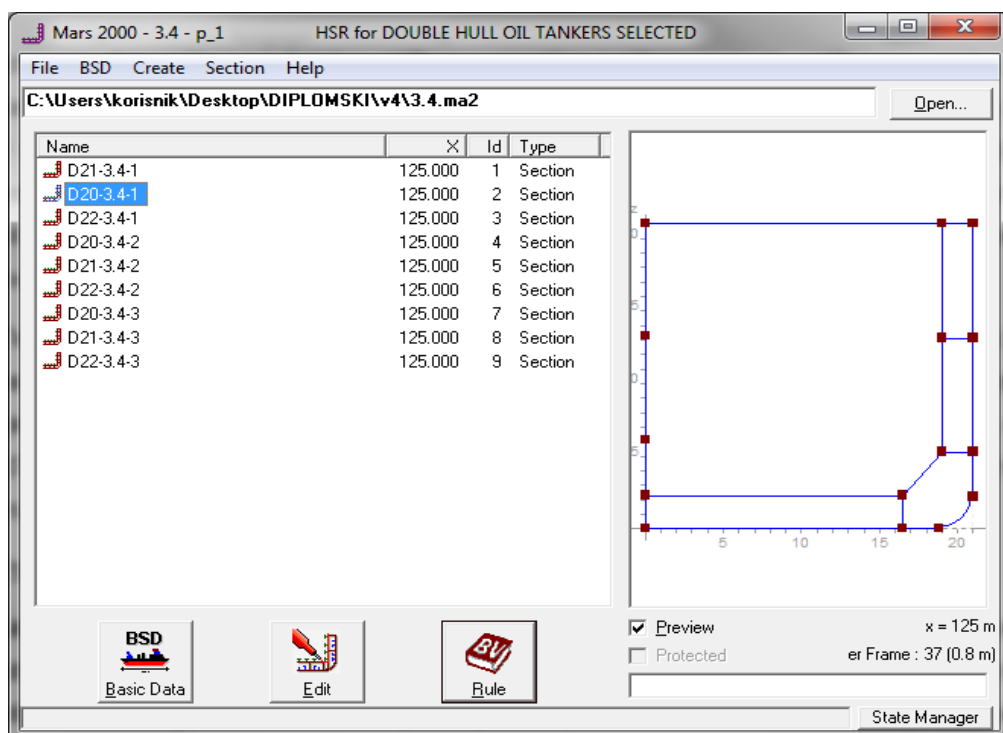
4.3. Ulazni podaci

Slijedi objašnjenje prikaza ulaznih podatka programa MARS2000. Ono je bitno radi veze programa i korištenog optimizacijskog algoritma. Lokacija i zapis pojedinih varijabli, kao i lokacija i zapis izlaznih podataka u programu MARS2000 je bitna radi definiranja optimizacijskog modela u kasnijem poglavlju.

Ulazni podaci dani su u vidu tekstualne datoteke. Skupovi podataka koji će se posebno razmatrati su limovi, odnosno na debljina limova, *strake thickness* i uzdužnjaci, odnosno dimenzije uzdužnjaka, *stiffener scantling* i njihov razmak,

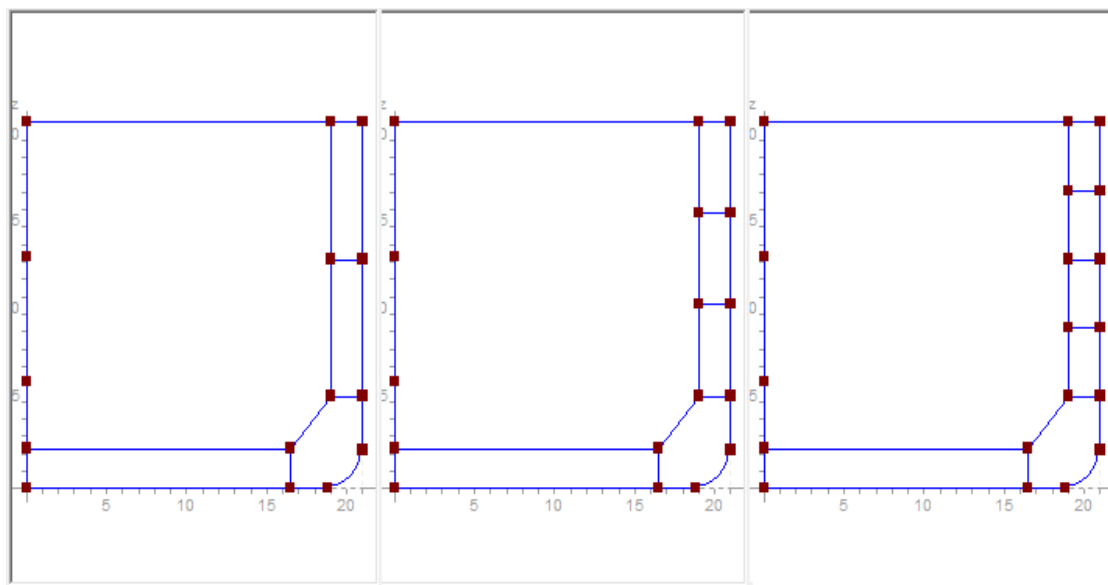
stiffener spacing. Navedene veličine su zapravo varijable potrebne za pripremu optimizacijskog modela. U daljnjem tekstu biti će navedeno kako doći do određenog podatka za svaki tip varijable kao i postupak promjene varijabla.

Razmatrati će se tri razmaka okvira. Za svaki razmak postoji jedna ulazna .txt datoteka koja se sastoji od devet sekcija. Svaka sekcija predstavlja varijaciju širine dvoboka i broja proveza. Te varijacije, kao i prije spomenute varijable sadržane su u grupama podataka naziva: paneli (ključna riječ „--PANELS--“), čvorovi (ključna riječ „--NODES--“), limovi (ključna riječ „--STRAKES--“), uzdužnjaci (ključna riječ „--STIFF LOC--“, „--STIFF SCANT--“, „--STIFF SCANT BIS--“ i „--FATIGUE--“). Svaka sekcija se sastoji od istih grupa podataka. Na slici 9 prikazan je izbornik programa MARS2000 koji prikazuje devet sekcija sa različitim topološko/ geometrijskim karakteristikama.



Slika 9. Varijante sekcija za određeni razmak

Na slici 10 prikazana su tri modela na kojima se lijepo može vidjeti promjena topologije, konkretno broj proveza u boku.



Slika 10. Varijante modela sa različitim brojem proveza

4.3.1. Promjena varijabla

Kako bi došlo do promjene interesantnih podataka, tj. varijabla potrebno je za određenu .txt datoteku definirati sljedeće: sekciju, varijablu koja se mijenja unutar određene sekcije, relativnu poziciju varijable i povezanost promatrane varijable sa ostalim podacima (ukoliko povezanosti postoji).

Sekcija

Broj sekcije se nalazi u grupi podataka koja započinje sa ključnom riječi „--SECTION-“, u prvom retku koji nije komentar, tj. dva retka ispod ključne riječi. Komentar možemo prepoznati tako što započinje sa zvijezdicom, *. Točan naziv sekcije nalazi se u grupi podataka koja počinje sa ključnom riječi „--MAIN--“, 16 retka ispod nje, tj. nalazi se nakon završetka komentara. Naziv svake sekcije je proizvoljan, a ovdje je napravljen tako da u sebi sadrži varijaciju topološko/ geometrijskih karakteristika. Na slici 11 je prikazan broj sekcije, kao i njezin točan naziv. Za ovaj konkretni primjer vidimo da se radi o sekciji širine dvoboka 2100 mm, razmaka okvira 3400 mm i sa jednom provezom.

----- SECTION -----									
* 1									
SECTION									
* 3.006									
* Software version : 2.9 R700 32bit									
* Data version : 3.006									
* User : Lea, , 04.04.2017 22:02:55									
* Login : Lea									
* ----- MAIN -----									
* Name									
* SectX	SdX(1)	SdX(2)	SdX(3)	Mat(1)	Mat(2)	Mat(3)	Mext(1)	Mext(2)	1
* BS(1,1)	BS(1,2)								2
* BS(2,1)	BS(2,2)								3
* BS(3,1)	BS(3,2)								4
* BWav1	BWav2								5
* Fatigue : ToeAngle(1), (2), OptFull, OptGrind									6
* State : StateType(1-3), State Index									7
* Hold data : Stool vol.	Hopper breadth	Hopper heigth/BL	HC Vol	Hold Vol no HC	Cyl. Hold				8
* Sym flag : 0 total, 1 quasi, 2 not sym	UseCalcMoments	UseCalcWaveMoments	Shear Strength						9
* Section ID									10
* BWaveIncl(1 to 2)									11
* hWave(1 to 2)	UserWaveBM_Vert	UserWaveBM_Horiz	UserWaveShipMot	UserWaveShearForce	ShearWave				12
* FatsWBM									13
* IsWithDamStabCalc	ZDeepEqWrtline	ShearDam	ShearHar						14
* StartFr Nb	StartFr_In	EndFr_Nb	EndFr_In						15
D21-3.4-1									16
125	21	21	42	1	3	2	2	2	

Slika 11. Prikaz grupa podataka vezane za broj i naziv sekcije

Kada je prepoznat broj i naziv sekcije, ulazna datoteka se nastavlja učitavati dok se ne prepozna određena varijabla koju je potrebno promijeniti. Prva varijabla o kojoj će biti riječi je debljina lima.

Debljina lima- 1. varijabla

Na slici 12 prikazana je grupa podatka vezana za limove kako bi se što bolje mogao objasniti način na koji se dolazi do podatka za spomenutu varijablu. Posebno je istaknuta kolona sa debljinama lima, što je i prva varijabla. Varijabla će biti prepoznata i promijenjena ako je uz ključnu riječ definirana i njezina relativna pozicija. Prepoznavanje počinje sa definiranjem sekcije kako je spomenuto prije u tekstu. Nakon što je učitana sekcija, iduće bitno je ključna riječ sa kojom počinje grupa podataka u kojoj se nalazi tražena varijabla. Sa slike 12 se vidi da je ključna riječ „--STRAKES--“. Traženi podaci se nalaze nakon ključne riječi, u prvom retku koji nije komentar (drugi redak ispod ključne riječi). Uz redak, potrebno je definirati i kolonu u kojoj se nalaze podaci koji će se varirati. Prvi redak nakon ključne riječi sadrži komentar koji nam pomaže u definiranju interesantne kolone. U ovom slučaju interesantna je kolona tri i u njoj se vrijednosti koje će biti mijenjane kreću od retka

jedan do retka 21. Za sekciju sa slike 12 se vidi da je definiran 21 lim. Svaki lim definiran je za određeni panel, pa se također može vidjeti da su limovi jedan i dva dio panela 1-BTM, dok je npr. lim 15 dio panela 10-DECK.

1	2	3	4	5	6	7	8		
----- STRAKES -----									
* Panel	Wid	Th	Cot	HLoc	HBr	Material			
1	2	18.5	4	0	0	2	0		1
1	14.4	20.5	4	0	0	2	0		2
2	8.956	16.5	4	0	0	2	0		3
3	6.85	16.5	4	0	0	3	0		4
3	6.85	16.5	4	0	0	3	0		5
3	2	16.5	4	0	0	3	0		6
4	2.1	17	4	0	0	3	0		7
5	2	15	4	0	0	3	0		8
5	6.85	15	4	0	0	3	0		9
5	9.85	15	4	0	0	2	0		10
6	2.3	16	4	0	0	2	0		11
7	2.3	18	4	0	0	2	0		12
8	2.1	14	4	0	0	2	0		13
9	2.1	12.5	4	0	0	2	0		14
10	18.9	17	4	0	0	3	0		15
11	2	17	4	0	0	3	0		16
11	14.4	17	4	0	0	3	0		17
12	3.905	17	4	0	0	2	0		18
13	6.85	16.5	4	0	0	3	0		19
13	6.85	14.5	4	0	0	3	0		20
13	2	15.5	4	0	0	3	0		21
*									

Slika 12. Prikaz grupe podataka vezane za limove

Kod modela sa dvije proveze postoji veći broj limova, njih 22 i veći broj panela, njih 14, dok kod modela sa tri proveze postoji 23 lima i 15 panela. Konkretno radi se o sekciji devet, naziva D22-3.4-3 čija je grupa podataka za limove prikazana na slici 13. Posebno je istaknut veći broj panela i limova. Kod učitavanja grupe podataka za ovu sekciju, ključna riječ i kolona ostaju iste kao na prije spomenutom primjeru. Jedina promjena je veći broj podataka koji se varira, pa slijedeći primjer za sekciju jedan, traženi podaci se nalaze u prvom retku koji nije komentar, nakon ključne riječi „-- STRAKES--“, ponovno u koloni broj tri s tim da se interesantni podaci kreću od retka jedan do retka 23.

1	2	3	4	5	6	7	8		
----- STRAKES -----									
* Panel	Wid	Th	Cot	HLoc	HBr	Material			
1	2	18.5	4	0	0	2	0		1
1	14.3	20.5	4	0	0	2	0		2
2	9.056	16.5	4	0	0	2	0		3
3	6.85	16.5	4	0	0	3	0		4
3	6.85	16.5	4	0	0	3	0		5
3	2	16.5	4	0	0	3	0		6
4	2.2	17	4	0	0	3	0		7
5	2	15	4	0	0	3	0		8
5	6.85	15	4	0	0	3	0		9
5	9.85	15	4	0	0	2	0		10
6	2.3	16	4	0	0	2	0		11
7	2.3	18	4	0	0	2	0		12
8	2.2	14	4	0	0	2	0		13
9	2.2	12.5	4	0	0	2	0		14
10	18.8	17	4	0	0	3	0		15
11	2	17	4	0	0	3	0		16
11	14.3	17	4	0	0	3	0		17
12	3.905	17	4	0	0	2	0		18
13	6.85	16.5	4	0	0	3	0		19
13	6.85	14.5	4	0	0	3	0		20
13	2	15.5	4	0	0	3	0		21
14	2.2	12.5	4	0	0	2	0		22
15	2.2	12.5	4	0	0	2	0		23
*									

Slika 13. Prikaz sekcije sa maksimalnim brojem panela i lima

Kod ove grupe podataka bitno je još spomenuti materijal korišten za izradu lima. Njega također možemo promatrati kao varijablu. Na slici 13, u koloni sedam se vidi da je svakom limu pridružena neka vrsta materijala. U programu MARS2000, materijal je bilo potrebno definirati prije početka izrade glavnog rebra. Definirane su tri vrste materijala: ugljični čelik granice tečenja 235 N/mm^2 , čelik povišene čvrstoće s granicom tečenja 315 N/mm^2 (AH 32) i čelik povišene čvrstoće s granicom tečenja 355 N/mm^2 (AH 36). Svakom navedenom je pridružen redni broj od 1-3, tako se na slici 13 može vidjeti kako su limovi konstruirani pojačanim čelikom 2 (AH 32) i pojačanim čelikom 3 (AH 36). U ovom radu razmatrati će se samo kontinuirane varijable, tako da materijal koji je diskretna varijabla, neće biti jedna od njih.

Dimenzije uzdužnjaka- 2. varijabla

Grupe podataka u kojima se nalaze iduće dvije varijable počinju ključnom riječi „--STIFF LOC--„ i „--STIFF SCANT--„. Te dvije grupe usko su povezane jer promjenom razmaka uzdužnjaka direktno utječemo na grupu podataka vezanu za dimenzije uzdužnjaka. Na slici 14 prikazane su dimenzije uzdužnjaka. Radi se o visini struka, debljini struka, širini flanže i debljini flanže. Kako bi bilo preglednije, napravljen je rez između uzdužnjaka 23 i ukupnog broja uzdužnjaka za prikazani model.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
----- STIFF SCANT -----																			
* Ipan	Type	hweb	tweb	hflan	tflan	Mater.	Igrp	Beff	SpanR	Bracket	Brlen	BrType	hweb	tweb	hflan	tflan	WebYoungMod	FLYoungMod	GlobalId
1	4	400	11	200	22	3	1	-1	0	0	0	0							1
1	4	400	11	200	22	3	1	-1	0	0	0	0							2
1	4	400	11	200	22	3	2	-1	0	0	0	0							3
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							4
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							5
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							6
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							7
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							8
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							9
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							10
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							11
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							12
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							13
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							14
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							15
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							16
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							17
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							18
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							19
1	4	400	11	200	22	3	3	-1	0	0	0	0							20
2	4	400	11	200	22	3	1	-1	0	0	0	0							21
2	4	400	11	200	22	3	1	-1	0	0	0	0							22
2	4	400	11	200	22	3	1	-1	0	0	0	0							23
...																			
13	4	300	11	180	22	2	1	-1	0	0	0	0							142
13	4	300	11	180	22	3	1	-1	0	0	0	0							143
13	4	300	11	180	22	3	1	-1	0	0	0	0							144
13	4	300	11	180	22	3	2	-1	0	0	0	0							145

Slika 14. Prikaz grupe podataka vezane za dimenzije uzdužnjaka

Da bi došlo do promjene dimenzija potrebno je ponoviti prije spomenuti postupak. Ključna riječ za ovu grupu podataka je „--STIFF SCANT--“. Interesantni podaci se nalaze u prvom retku koji nije komentar, te u kolonama od tri do šest i u njima se vrijednosti kreću od prvog spomenutog retka (prvi koji nije komentar) do retka 145, odnosno 147 za modele sa dvije proveze, a za modele sa tri proveze do retka 149. U koloni dva prikazan je tip ukrepe te se na slici 14 vidi kako je svakom uzdužnjaku pridružen redni broj četiri. Prema programu MARS2000 taj broj znači da se radi o T-profilu. U koloni sedam definiran je materijal svakog uzdužnjaka, a princip definiranja je isti onome kao kod grupe podataka vezane za limove.

Razmak uzdužnjaka- 3. varijabla

Ova varijabla se nalazi u grupi podataka koja počinje ključnom riječi „--STIFF LOC--“. Ovo je najdelikatnija varijabla jer njenom promjenom utječemo na ostale podatke u grupi kao i na podatke u drugim grupama. Osim spomenute grupe sa dimenzijama uzdužnjaka, „--STIFF SCANT--“, mijenjaju se i grupe „--STIFF SCANT BIS--“, i „--FATIGUE--“. Interesantni podaci se nalaze ispod ključne riječi, u prvom retku koji nije komentar te u kolonama četiri, pet i sedam i u njima se vrijednosti kreću od prvog spomenutog retka do retka 21, odnosno 22 za modele sa dvije proveze i do retka 23 za modele sa tri proveze. Na slici 15 se vidi spomenuta grupa.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
----- STIFF LOC -----											
* Panel	Ipan	Inod	Nstiff	Start	Cot	Spac	Dir	Side	Flange		
1	1	1	20	0.8	4	0.8	0	1	1	1	1
2	1	2	3	0.8	4	0.8	0	1	1	1	2
2	2	3	4	0	4	0.8	0	1	1	1	3
3	2	4	9	0.8	4	0.8	0	1	1	1	4
3	2	4	7	8	4	0.8	0	1	1	1	5
3	2	4	3	13.6	4	0.8	0	1	1	1	6
4	3	3	2	0.7	4	0.7	0	1	1	1	7
5	10	2	3	0.8	4	0.8	0	1	1	1	8
5	10	2	6	3.2	4	0.8	0	1	1	1	9
5	10	2	10	8	4	0.8	0	1	1	1	10
5	10	2	4	16	4	0.8	0	1	1	1	11
6	5	4	2	0.8	4	0.8	0	1	1	1	12
7	7	1	2	0.8	4	0.8	0	2	1	1	13
8	8	1	2	0.7	4	0.7	0	1	1	1	14
9	9	1	2	0.7	4	0.7	0	1	1	1	15
10	4	2	23	0.8	4	0.8	0	1	1	1	16
11	5	4	20	0.8	4	0.8	0	2	1	1	17
12	7	2	4	0.78	4	0.78	0	2	1	1	18
13	8	2	9	0.8	4	0.8	0	2	1	1	19
13	8	2	7	8	4	0.8	0	2	1	1	20
13	8	2	3	13.6	4	0.8	0	2	1	1	21
*											

Slika 15. Prikaz grupe podataka vezane za razmak uzdužnjaka

Prema već spomenutome, kolona četiri sadrži broj uzdužnjaka. Na slici 15 se vidi da na prvom panelu ima ukupno 20 uzdužnjaka, sadržanih u jednoj grupi, dok na panelu tri ima ukupno 19 uzdužnjaka sadržanih u tri grupe. Na jednom panelu može biti onoliko grupa koliko ima različitih razmaka. Do poveznice ove grupe podataka sa grupom koja sadrži dimenzije uzdužnjaka dolazimo jer ukupan broj uzdužnjaka na panelu sadržan u koloni četiri kod grupe podataka „--STIFF LOC--“, mora biti jednak ukupnom broju uzdužnjaka na tom istom panelu u grupi podataka „--STIFF SCANT--“, „--STIFF SCANT BIS--“, i „--FATIGUE--“. Uzdužnjaci svakog panela su definirani s obzirom na čvorove, tako da zadnji uzdužnjak prvog panela nema nikakve veze sa prvim uzdužnjakom drugog panela. To znači da su uzdužnjaci različitih panela neovisni jedni o drugima. Kako bi znali koliko uzdužnjaka, sa određenim razmakom, može stati na pojedini panel potrebno je imati na umu širinu svakog panela. U Tablici 4 su prikazane širine svih panela. Iz nje se vidi da je panel jedan širok 16.4 m, dok panel tri počinje na visini od 5.3 m i završava na visini od 21 m što ga čini širokim 15.7 m. Točke y i z su zapravo koordinate čvorova koji se nalaze na panelima.

Tablica 4. Prikaz širina panela

Panel	y	z
1	0	0
1	16.4	0
2	16.4	0
2	18.8	0
2	21	2.2
2	21	5.3
3	21	5.3
3	21	13.15
3	21	21
4	21	21
4	18.9	21
5	0	21
5	0	13.3
5	0	6.1
5	0	2.3
6	0	2.3
6	0	0
7	16.4	0
7	16.4	2.3
8	21	5.3
8	18.9	5.3
9	21	13.15
9	18.9	13.15
10	18.9	21
10	0	21
11	0	2.3
11	16.4	2.3
12	16.4	2.3
12	18.9	5.3
13	18.9	5.3
13	18.9	13.15
13	18.9	21
14	21	13.15
14	18.8	13.15
15	21	17.075
15	18.8	17.075

Slijedi konkretan primjer utjecaja razmaka uzdužnjaka na ostale podatke u grupi kao i utjecaj na ostale grupe podataka. Primjer je dan za panel 3-SIDE SHELL koji ima tri grupe uzdužnjaka.

n – broj uzdužnjaka u određenoj grupi uzdužnjaka

s – razmak uzdužnjaka [m]

x – početak određene grupe uzdužnjaka [m]

$n_1 = \frac{8}{s_1}$, zaokružuje se na cijeli broj

$x_1 = s_1$

$$n_2 = \frac{13 - (s_1 \cdot n_1)}{s_2}, \text{ zaokružuje se na cijeli broj}$$

$$x_2 = s_1 \cdot n_1 + s_2$$

$$n_3 = \frac{15.7 - ((s_1 \cdot n_1) + (s_2 \cdot n_2))}{s_3}, \text{ 15.7 = konstanta, rezultat se zaokružuje na } \underline{\text{manji}} \text{ cijeli broj}$$

$$x_3 = s_1 \cdot n_1 + s_2 \cdot n_2 + s_3$$

Slijedeći prikazani postupak na jednostavan se način može odrediti početak svake grupe uzdužnjaka kao i njihov broj u svakoj grupi s pretpostavkom da je razmak uzdužnjaka svake grupe poznat. U jednadžbama za broj uzdužnjaka, brojevi 8 i 13 su okvirne granice koje su postavljene gledajući konstrukciju glavnog rebra. U posljednjoj jednadžbi za broj uzdužnjaka, n_3 broj 15.7 je ukupna širina panela 3-SIDE SHELL na koji smještamo uzdužnjake, tako da se taj broj ne mijenja.

Osim grupa u kojima su smještene varijable, treba spomenuti još dvije grupe podataka na koje utječu promjene nastale u grupi sa razmakom uzdužnjaka. To su „--STIFF SCANT BIS--„ i „--FATIGUE--„. Bitni podaci u grupi sa ključnom riječi „--STIFF SCANT BIS--„ se kreću od kolone jedan do kolone tri. Promjene u ovoj grupi podataka se sastoje od dodavanja ili oduzimanja redaka ovisno o tome da li smo smanjili razmak uzdužnjaka (što znači da se broj uzdužnjaka vjerojatno povećao) ili ga povećali (što znači da se broj uzdužnjaka vjerojatno smanjio). Podaci koji se nalaze izvan ove tri kolone nisu bitni, tj. u njima ne dolazi do nikakvih promjena. Promjene koje treba unijeti kod grupe podataka sa ključnom riječi „--FATIGUE--„ kreću se u prve tri kolone i od prvog retka koji nije komentar, odmah ispod ključne riječi. Komentar kod ove grupe podataka se proteže kroz tri retka, tako da je prvi interesantni redak četvrti po redu ispod ključne riječi. Podaci u ostalim kolonama se mogu zanemariti. Na kraju se zaključuje da do promjene podataka dolazi svaki treći redak. Prvi se mijenja, druga dva se prepisu. Četvrti se mijenja, peti i šesti se prepisu, itd.

4.4. Opis kriterija podobnosti

4.4.1. Kriteriji podobnosti vezani za limove

Kod proračuna lokalnih dimenzija limova program daje *gross* i *net* dimenzije. *Gross* veličine su sve one računate sa korozijskim dodatkom, dok su *net* one veličine računate bez dodatka za koroziju. Na slici 16 se vidi da su dani rezultati za *gross* i *net* dimenzije.

Panel: 1 - BTM			
	Strake	E.P.P.	
	Actual	Rule	Case
Gross			
Thickness	18.50	18.00	
Net			
Load Thick.	15.50	12.00	HSM1
Test Thick.	15.50	11.50	
Mini Thick.	15.50	15.00	Mini
Eta Bu. Plate	0.68	1.00	HSM
HGS Bend.	180.48	243.59	Nav
HGS Tau	23.89	153.85	Nav

Slika 16. Vrijednosti vezane uz limove

Za svaku veličinu dana je aktualna i vrijednost zahtijevana prema harmoniziranim Pravilima. Redom prema slici 16 dana je:

- *gross* debljina lima, *Thickness*
- *net* debljina lima, *Load Thick.*, *Test Thick.* i *Mini Thick.* Te tri vrijednosti su kriteriji koji ovise o tlaku, tj. stanju opterećenja. Program od te tri vrijednosti uzima onu koja je najveća i to je *net* minimalna debljina oplata koja sa korozijskim dodatkom čini *gross* minimalnu debljinu oplata.
- kriterij izvijanja, *Eta Bu. Plate*
- normalna naprezanja, *HGS Bend.*
- smična naprezanja, *HGS Tau*

Kod vrijednosti koje su vezane za debljinu lima aktualna vrijednost, *Actual* mora biti veća ili jednaka onoj zahtijevanoj od strane pravila, *Rule*. Kod kriterija izvijanja, normalnih i smičnih naprezanja vrijedi da trenutna vrijednost mora biti manja od one zahtijevane od strane pravila.

4.4.2. Kriteriji podobnosti vezani za uzdužnjake

Panel: 1 - BTM			
	Actual	Rule	Case
Gross			
W	2242.64	1825.23	
Tw Mini.	11.0	10.0	
Tfl Mini.	22.0	13.0	
BFI Mini.	200.0	104.0	
Net			
W Load	1866.03	1518.72	HSM1
W Test	1866.03	1110.37	
Shr Tw Load	8.00	4.61	OSA2
Shr Tw Test	8.00	4.75	
Eta Bu. Over.	0.07	1.00	HSM2
Eta Bu. Sti.	0.70	1.00	FSM2
Inertia Mini.	5.47e4	6.55e3	
Tw Mini.	8.0	7.0	Mini
Tfl Mini.	19.0	10.0	Prop
BFI Mini.	197.0	101.0	Prop
Fatigue Life	26.0	25.0	Aft
HGS Bend.	180.48	263.89	Nav

Slika 17. Vrijednosti vezane uz uzdužnjake

Kod proračuna lokalnih dimenzija uzdužnjaka program daje daje *gross* i *net* dimenzije kako je već spomenuto kod vrijednosti vezanih za limove. Također je za svaku veličinu dana aktualna i vrijednost zahtijevana prema harmoniziranim Pravilima. Redom prema slici 17 dane su *gross* vrijednosti:

- moment otpora, *W*.
- minimalna debljina struka, *Tw Mini*.
- minimalna debljina prirubnice, *Tfl Mini*.
- minimalna širina prirubnice, *BFI Mini*.

Kod navedenih veličina aktualna vrijednost mora biti veća ili jednaka onoj zahtijevanoj od strane pravila. Dalje prema slici 17 su dane *net* veličine i to redom:

- moment otpora, *W Load*, *W Test*.
- minimalna debljina struka kako bi se zadovoljila smična naprezanja, *Shr Tw Load*, *Shr Tw Test*.
- kriterij izvijanja, *Eta Bu. Over.*, *Eta Bu. Sti*.
- minimalni moment inercije, *Inertia Mini*.
- minimalna debljina struka, *Tw Mini*.
- minimalna debljina prirubnice, *Tfl Mini*.
- minimalna širina prirubnice, *BFl Mini*.
- životni vijek, *Fatigue Life*.
- normalna naprezanja, *HGS Bend*.

Kod navedenih veličina aktualna vrijednost mora biti veća ili jednaka onoj zahtijevanoj od strane pravila, osim kod kriterija izvijanja, *Eta Bu. Over.*, *Eta Bu. Sti*. i kod normalnih naprezanja, *HGS Bend*. gdje aktualna vrijednost mora biti manja od one zahtijevane od strane propisa.

4.5. Izlazni podaci

Izlazni podaci računalnog programa MARS2000 također se mogu prikazati u tekstualnom obliku.

Limovi

```

Panel: 1 Strake: 1
Gross Thick.: Actual      Rule      Case
Sig. Nor.:    18.50       18.00
Tau. Nor.:    180.48      243.59
Net Load Thick.: 23.89    153.85
Net Test Thick.: 15.50    12.00
Net Mini Thick.: 15.50    11.50
Eta Bu. Plate: 0.68       1.00
SEABAL 1 HSM1
Mini
HSM2 Nav - T_sc

Panel: 1 Strake: 2
Gross Thick.: Actual      Rule      Case
Sig. Nor.:    20.50       16.00
Tau. Nor.:    180.48      243.59
Net Load Thick.: 51.40    153.85
Net Test Thick.: 17.50    12.50
Net Mini Thick.: 17.50    11.50
Eta Bu. Plate: 0.66       1.00
SEABAL 1 HSM1
Mini
HSM2 Nav - T_sc

Panel: 2 Strake: 1
Gross Thick.: Actual      Rule      Case
Sig. Nor.:    16.50       16.50
Tau. Nor.:    180.48      243.59
Net Load Thick.: 62.80    153.85
Net Test Thick.: 13.00    13.00
Net Mini Thick.: 13.00    11.50
Eta Bu. Plate: 0.80       1.00
SEA BSP1 P
Mini
HSM2 Nav - T_sc

```

Slika 18. Prikaz izlaznih podataka za limove

Izlazni podaci će biti uspoređivani na način da aktualna vrijednost, *Actual* mora biti veća ili jednaka onoj zahtijevanoj od strane pravila, *Rule*. Kod kriterija izvijanja, normalnih i smičnih naprezanja vrijedi da trenutna vrijednost mora biti manja od one

zahtijevane od strane pravila. Kako bi se interesantne vrijednosti prikazane na slici 18 mogle prepoznati i usporedit potrebno je definirati gdje se nalaze. Kod limova vrijednosti počinju sa redom u kojem se nalazi idući komentar „Panel: 1 Strake: 1“. Nakon toga slijedi još jedan komentar te zapravo od trećeg retka počinju podaci koji se uspoređuju. Kako je već spomenuto, uspoređuje se aktualna vrijednost i ona koja je propisana od strane pravila. Podaci su prikazani tako da vrijedi iduće: jedan redak za svaku veličinu. Na slici 18 se vidi da je prva veličina kojoj će se uspoređivati *Actual* i *Rule* vrijednost, *gross* debljina. Dalje slijede normalna naprezanja, itd. Za svaki lim će se uspoređivati sedam veličina. Limovi su definirani za svaki panel na način da sa svakim novim panelom numeriranje lima počinje ispočetka.

Uzdužnjaci

Panel: 1 Stiffener: 1			
	Actual	Rule	Case
Gross W.:	2242.64	1825.23	
Gross Mini Thick.:	11.00	10.00	
Net Sig. Nor.:	180.48	263.89	
Net Sig. Comb.:	0.00	263.89	
Net Load W.:	1866.03	1518.72	SEABAL 1 HSM1
Net Load Shr tw.:	8.00	4.61	SEABAL 1 OSA2 P
Net Test W.:	1866.03	1110.37	Tst 1
Net Test Shr tw.:	8.00	4.75	Tst 1
Net Mini Tweb:	8.00	7.00	Mini
Net Mini Tflange:	19.00	10.00	Prop
Net Mini Bflange:	197.00	101.00	
Net Mini Inertia:	54700.89	6554.75	
Eta Bu. Over.:	0.07	1.00	
Eta Bu. Sti.:	0.70	1.00	SEA FSM2
Fatigue Life:	25.98	25.00	
Panel: 1 Stiffener: 2			
	Actual	Rule	Case
Gross W.:	2242.64	1834.58	
Gross Mini Thick.:	11.00	10.00	
Net Sig. Nor.:	180.48	263.89	
Net Sig. Comb.:	0.00	263.89	
Net Load W.:	1866.03	1526.50	SEABAL 1 HSM1
Net Load Shr tw.:	8.00	4.63	SEABAL 1 OSA2 P
Net Test W.:	1866.03	1110.37	Tst 1
Net Test Shr tw.:	8.00	4.75	Tst 1
Net Mini Tweb:	8.00	7.00	Mini
Net Mini Tflange:	19.00	10.00	Prop
Net Mini Bflange:	197.00	101.00	
Net Mini Inertia:	54700.89	6554.75	
Eta Bu. Over.:	0.07	1.00	
Eta Bu. Sti.:	0.72	1.00	SEA FSM2
Fatigue Life:	25.70	25.00	

Slika 19. Prikaz izlaznih podataka za uzdužnjake

Izlazni podaci uzdužnjaka će biti uspoređivani na način da aktualna vrijednost, *Actual* mora biti veća ili jednaka onoj zahtijevanoj od strane pravila, *Rule*, osim kod kriterija izvijanja, *Eta Bu. Over.*, *Eta Bu. Sti.* i kod normalnih naprezanja gdje aktualna vrijednost mora biti manja od one zahtijevane od strane propisa. Kako bi se

interessantne vrijednosti prikazane na slici mogle prepoznati i usporediti potrebno je definirati gdje se nalaze. Kod uzdužnjaka vrijedi isto pravilo, prvi red je komentar u kojem se prepoznaje o kojem panelu i uzdužnjaku se radi „Panel: 1 Stiffener: 1“. Slijedi još jedan red sa komentarom, te onda počinju veličine koje se promatraju. Također vrijedi da se svaka uspoređivana veličina nalazi u svom retku. Za svaki uzdužnjak će se uspoređivati 15 veličina. Uzdužnjaci su definirani kao i limovi, sa svakim novim panelom njihovo numeriranje kreće ispočetka.

4.6. Određivanje mase konstrukcije

Masu uzdužne konstrukcije vrlo je lako odrediti nakon provedenog proračuna u programu MARS2000 jer jedan od izlaznih podataka je onaj o površini poprečnog presjeka uzdužne strukture, odnosno program daje površinu svih uzdužnih elemenata glavnog rebra. Kada ovu površinu pomnožimo s duljinom skladišta te s gustoćom čelika, dobije se masa uzdužne strukture skladišta.

Masa poprečne strukture ne može se odrediti pomoću programa MARS2000, jer on omogućuje samo provjeru podobnosti uzdužne strukture. Približan proračun poprečne strukture je napravljen prema referentnom modelu iz kojega su preuzete dimenzije poprečne strukture. Dimenzije poprečnih elemenata korištenih za aproksimaciju mase jednog okvira dane se u Tablici 5 i 6.

Tablica 5. Dimenzije i masa poprečnih elementa konstrukcije

Element konstrukcije	Površina [m ²]	Debljina [mm]	Masa [t]
Rebrenica	13.20	14	1.45
	11.32	13	1.15
	12.42	17	1.66
Okvir uzvojnog tanka	20.89	12.5	2.05
Okvir boka	9.84	12	0.93
	11.48	12	1.08
	10.87	12.5	1.07
Suma			9.39

Tablica 6. Dimenzije i masa vertikalnih ukrepa

Ukrepa	Površina [m ²]	Duljina [m]	Količina	Masa [t]
Dvodno, FB 150X13	0.0020	1.48	19	0.43
Uzvojni tank, FB 150x13	0.0020	1.88	3	0.09
FB 200X12	0.0024	0.85	4	0.06
FB 150X12	0.0018	1.01	4	0.06
Dvobok, FB 150X12	0.0018	1.45	17	0.35
Paluba, FB 200X12	0.0024	0.69	22	0.28
Sponja, T 1700X12+250X20	0.0254	18.95	1	3.78
Pregrada, FB 200X12	0.0024	14.25	3	0.81
T 2400X12.5+250X25	0.0363	3.6	1	1.02
T 2400X17+250X25	0.0471	5.6	1	2.07
T 2400X12+250X25	0.0351	4	1	1.10
T 2400X15+250X20	0.0410	3.8	1	1.22
Suma				11.27

Kako bi se dobila masa pojedinog elementa/ ukrepe, određena je prvo površina istog. Ta je površina pomnožena s debljinom kod elementa, odnosno duljinom kod ukrepa i na kraju sa gustoćom čelika kako bi se dobila masa. U Tablicama 5 i 6 dane su mase za pola širine broda, ukupna masa poprečne strukture za punu širinu broda dana je u Tablici 7.

Tablica 7. Ukupna masa poprečne strukture okvira

	Masa [t]
Element konstrukcije	18.77
Ukrepe	22.54
Suma	41.32

Izračunata ukupna masa poprečne strukture okvira biti će jednaka za sve modele. To je greška koju unosimo u proračun jer zapravo, promjenom spomenutih varijabla utječemo i na dimenzije poprečne strukture, pa samim time mijenjamo i njenu masu. Ovaj je približni postupak određivanja mase poprečne strukture korišten zbog nemogućnosti proračunavanja podobnosti poprečne strukture programom MARS2000. Zbrajanjem mase uzdužne i poprečne strukture dobije se ukupna masa konstrukcije pojedinog modela. Ovi podaci služe kako bi mogli povezati masu konstrukcije, koju gledamo kao projektni cilj, sa promjenama projektnih varijabla.

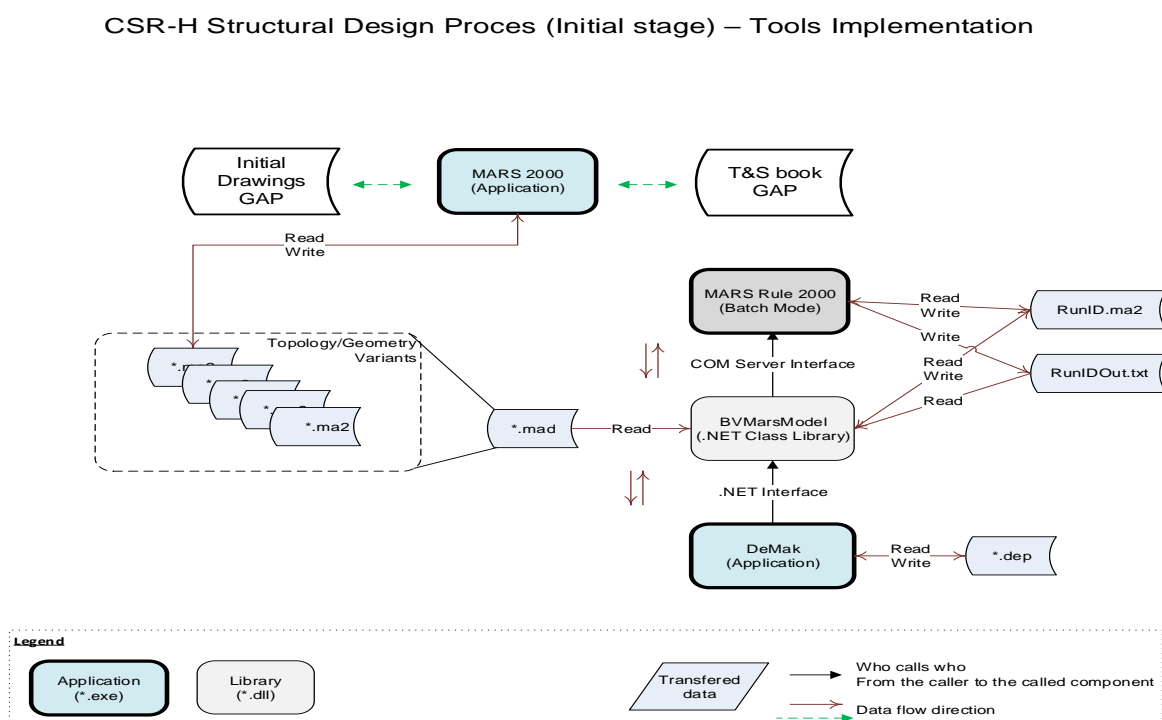
Odnosno kako bi bilo usporedivo kako promjena pojedinih varijabla utječe na ukupnu masu konstrukcije.

4.7. Optimizacija glavnog rebra

Optimizacijski problem definiran je pomoću varijabli, atributa i ograničenja. U ovom radu zadatak je pronaći projekte sa Pareto fronte koji će najbolje zadovoljavati ciljeve minimizacije mase i maksimizacije graničnog momenta.

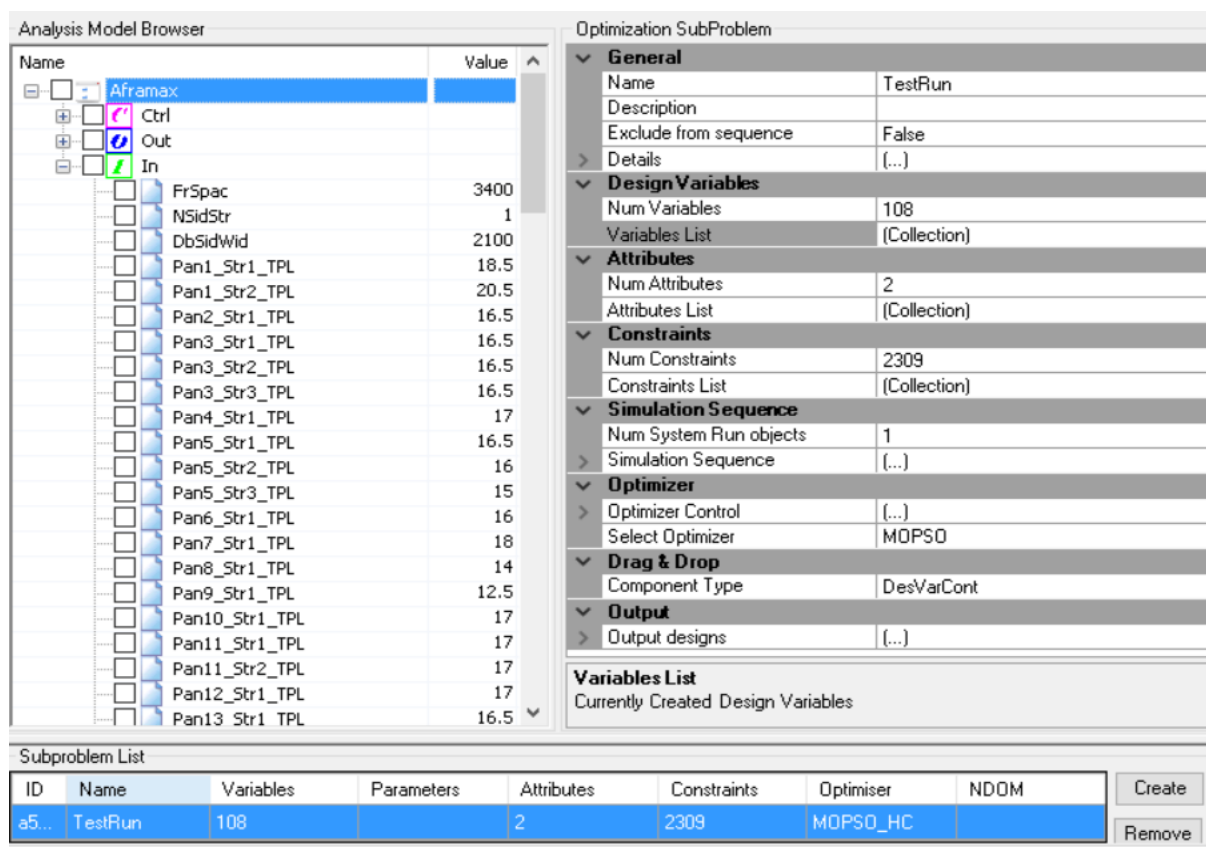
4.7.1. Definicija optimizacijskog problema

Za provođenje višeciljne optimizacije korišten je program DeMak – OCTOPUS Designet. Kako bi se postupak optimizacije mogao provesti potrebna je prethodna priprema optimizacijskog modela. U ovom radu to obuhvaća pripremu podataka pomoću programa MARS2000. Njime su proračunate dimenzije opločenja, dimenzije i momenti otpora presjeka ukrepa, proračunati su granični i zahtijevani momenti savijanja trupa. Program DeMak je povezan sa programom MARS2000 putem ulazno - izlaznih datoteka, slika 20.



Slika 20. Skica povezanosti programa MARS2000 sa programom DeMak

Na slici 21 prikazana je kontrolna ploča na kojoj su vidljivi podaci analiza, optimizacije i podproblema.



Slika 21. Optimizacijska kontrolna ploča programa DeMak

Na prethodnoj slici vidi se optimizacijski problem sa 108 projektnih varijabli, 2309 ograničenja i dva cilja.

4.7.2. Projektne varijable

Uz tri geometrijsko/ topološke varijable definirane u Tablici 3, varijable su definirane kao dimenzije uzdužno usmjerenih elementa konstrukcije, odnosno elemenata koji sudjeluju u uzdužnoj čvrstoći brodskoga trupa. Veličine koje su korištene kao varijable su debljine limova i dimenzije uzdužnjaka, odnosno debljina i visina struka, te debljina i širina prirubnice. Razmak uzdužnjaka u okviru ovog rada nije tretiran kao projektna varijabla jer zbog tehničke složenosti nije provedena implementacija automatske izmjene te vrste podataka u okruženju DeMak - MARS2000.

Kod definiranja debljina limova zadane su minimalne i maksimalne debljine, te korak s kojim će se tražiti optimalna debljina. U radu je uzet korak 0.5 mm. Minimalne debljine proračunate su prema harmoniziranim Pravilima pomoću programa MARS2000. U Tablicama 8 i 9 dan je prikaz minimalnih i maksimalnih debljina limova i dimenzija uzdužnjaka. Za minimalnu debljinu limova je uzeta *rule* vrijednost proračunata programom MARS2000.

Tablica 8. Prikaz minimalnih i maksimalnih debljina limova

MARS2000	DeMak	min. [mm]	max. [mm]
1-BTM	Pan1_Str1	18	25
	Pan1_Str2	16	25
2-BILGE	Pan2_Str1	16.5	20
3-SIDE SHELL	Pan3_Str1	16.5	20
	Pan3_Str2	16.5	20
	Pan3_Str3	16.5	20
4-DECK STRINGER	Pan4_Str1	13.5	20
5-BULKHEAD	Pan5_Str1	14	20
	Pan5_Str2	14	20
	Pan5_Str3	14.5	20
6-KEELSON	Pan6_Str1	15	20
7-DBTM GIRDER	Pan7_Str1	13.5	20
8-SIDE STRINGER	Pan8_Str1	12.5	18
9-SIDE STRINGER_1	Pan9_Str1	12.5	18
10-DECK	Pan10_Str1	14	20
11-INNER BTM	Pan11_Str1	17	22
	Pan11_Str2	17	22
12-HOOPER	Pan12_Str1	15	20
13-INNER HULL	Pan13_Str1	14	20
	Pan13_Str2	14	20
	Pan13_Str3	14	20

Tablica 9. Prikaz minimalnih i maksimalnih dimenzija uzdužnjaka

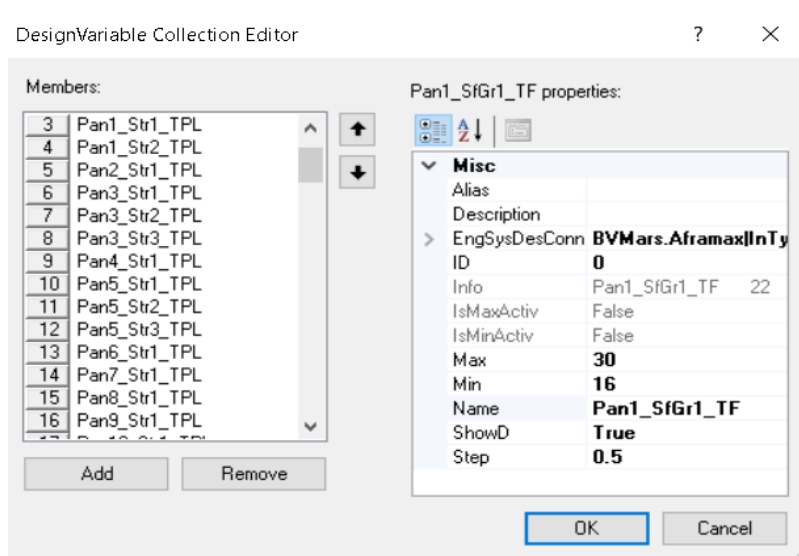
min. hweb [mm]	max. hweb [mm]	min. tweb [mm]	max. tweb [mm]	min. bflan [mm]	max. bflan [mm]	min. tflan [mm]	max. tflan [mm]
200	500	9	15	140	300	16	30

Kod definiranja dimenzija uzdužnjaka zadane su minimalne i maksimalne debljine visine i debljine struka uzdužnjaka, te širine i debljine prirubnice. Također je definiran i korak s kojim će se tražiti optimalna vrijednost, Tablica 10.

Tablica 10. Prikaz koraka pojedine dimenzije uzdužnjaka

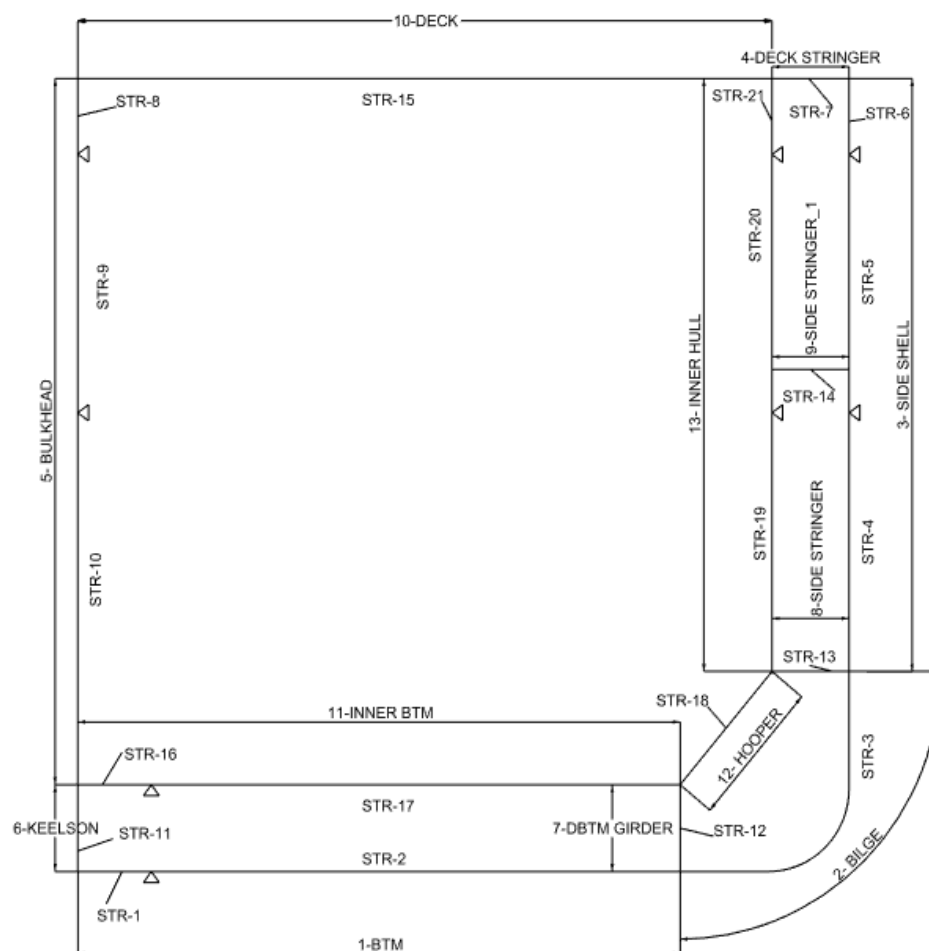
Dimenzija uzdužnjaka	Korak [mm]
hweb	10
tweb	0.5
bflan	5
tflan	0.5

Na slici 22 je prikazana kontrolna ploča programa DeMak na kojoj se vide definirane projektne varijable.



Slika 22. Prikaz projektne varijable- debljina lima u programu DeMak

Na slici 23 prikazani su nazivi panela u programu MARS2000. Ti nazivi nisu adekvatni za program DeMak te je u Tablici 11 dana poveznica naziva panela i limova između dva programa.

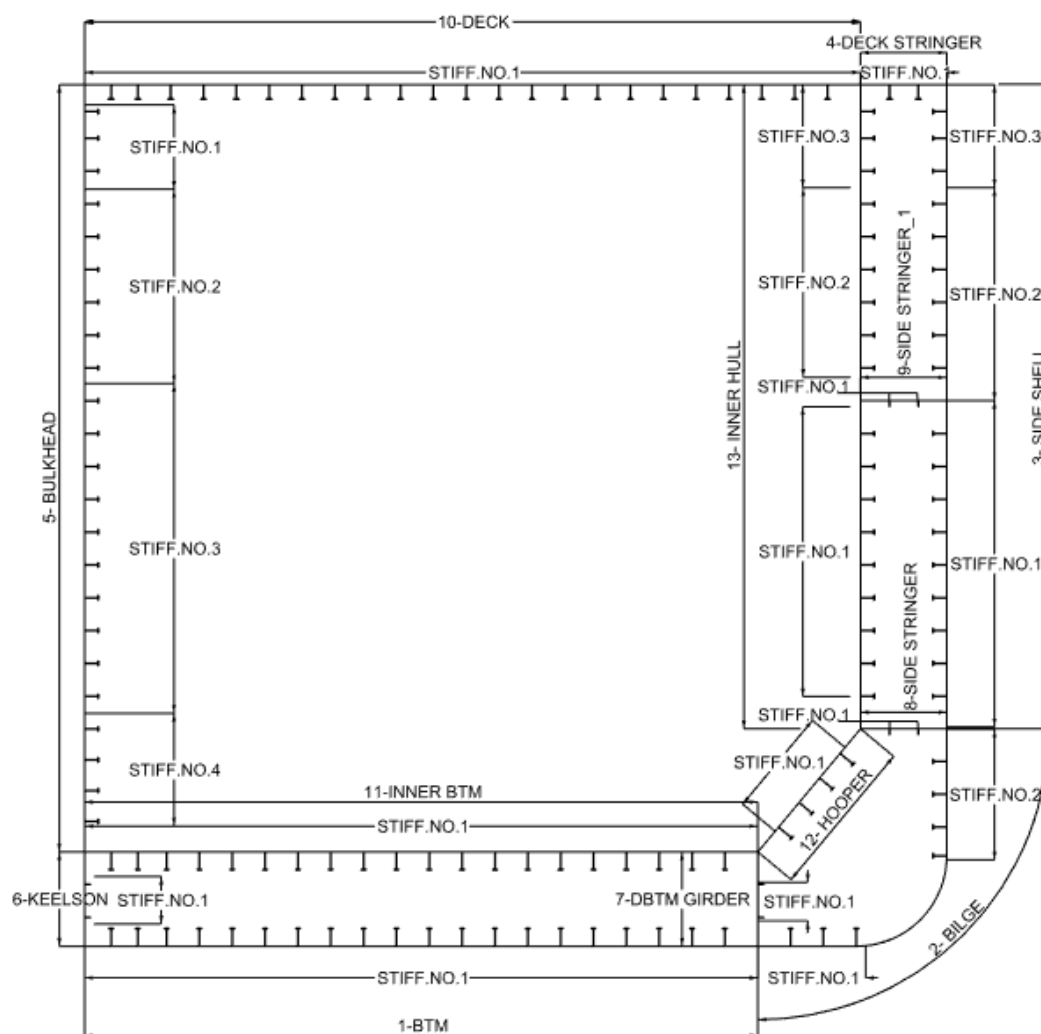


Slika 23. Definiranje panela i limova u programu MARS2000

Tablica 11. Poveznica naziva panela i limova između programa MARS2000 i DeMak

MARS2000	R.broj lima	DeMak
1-BTM	1	Pan1_Str1
	2	Pan1_Str2
2-BILGE	3	Pan2_Str1
3-SIDE SHELL	4	Pan3_Str1
	5	Pan3_Str2
	6	Pan3_Str3
4-DECK STRINGER	7	Pan4_Str1
5-BULKHEAD	8	Pan5_Str1
	9	Pan5_Str2
	10	Pan5_Str3
6-KEELSON	11	Pan6_Str1
7-DBTM GIRDER	12	Pan7_Str1
8-SIDE STRINGER	13	Pan8_Str1
9-SIDE STRINGER_1	14	Pan9_Str1
10-DECK	15	Pan10_Str1
11-INNER BTM	16	Pan11_Str1
	17	Pan11_Str2
12-HOOPER	18	Pan12_Str1
13-INNER HULL	19	Pan13_Str1
	20	Pan13_Str2
	21	Pan13_Str3
14-SIDE STRINGER_2	22	Pan14_Str1
15-SIDE STRINGER_3	23	Pan15_Str1

Na slici 24 također su prikazani su nazivi panela u programu MARS2000. Prikazane su i pozicije grupa uzdužnjaka. U Tablici 12 dan je usporedni prikaz naziva panela i grupa uzdužnjaka između dva programa.

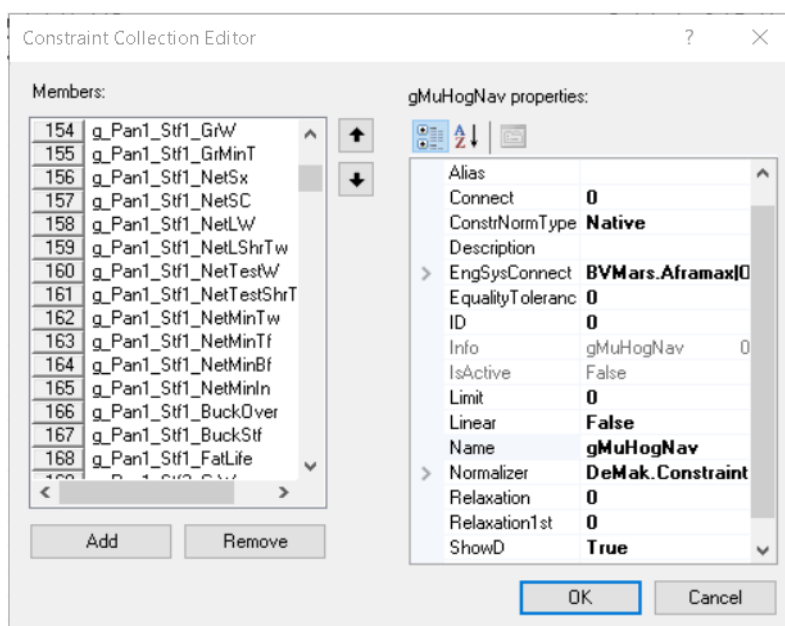


Slika 24. Definiranje panela i grupa uzdužnjaka u programu MARS2000

Tablica 12. Poveznica naziva panela i uzdužnjaka između programa MARS2000 i DeMak

MARS2000	Br.grupe uzdužnjaka	DeMak
1-BTM	1	Pan1_SfGr1
2-BILGE	1	Pan2_SfGr1
	2	Pan2_SfGr2
3-SIDE SHELL	1	Pan3_SfGr1
	2	Pan3_SfGr2
	3	Pan3_SfGr3
4-DECK STRINGER	1	Pan4_SfGr1
5-BULKHEAD	1	Pan5_SfGr1
	2	Pan5_SfGr2
	3	Pan5_SfGr3
	4	Pan5_SfGr4
6-KEELSON	1	Pan6_SfGr1
7-DBTM GIRDER	1	Pan7_SfGr1
8-SIDE STRINGER	1	Pan8_SfGr1
9-SIDE STRINGER_1	1	Pan9_SfGr1
10-DECK	1	Pan10_SfGr1
11-INNER BTM	1	Pan11_SfGr1
12-HOOPER	1	Pan12_SfGr1
13-INNER HULL	1	Pan13_SfGr1
	2	Pan13_SfGr2
	3	Pan13_SfGr3
14-SIDE STRINGER_2	1	Pan14_SfGr1
15-SIDE STRINGER_3	1	Pan15_SfGr1

4.7.3. Projektna ograničenja



Slika 25. Prikaz projektnih ograničenja u programu DeMak

S obzirom da je, kao i kod varijabli, korišteno različito nazivlje u programima MARS2000 i DeMak, u Tablici 13 dani su nazivi ograničenja za limove u programu MARS2000, nazivi ograničenja u izlaznoj tekstualnoj datoteci te na kraju nazivi u programu DeMak. U Tablici 14 prikazano je korišteno nazivlje za kriterije podobnosti uzdužnjaka.

Tablica 13. Poveznica naziva ograničenja za limove između programa MARS2000 i programa DeMak

MARS2000	MarsOut	DeMak
Thickness	Gross Thick.	TPLGross
Load Thick.	Net Load Thick.	TPLNetLo
Test Thick.	Net Test Thick	TPLNetTe
Mini Thick.	Net Mini Thick	TPLNetMi
Eta Bu. Plate	Eta Bu. Plate	Buck
HGS Bend.	Sig. Nor.	Sx
HGS Tau	Tau. Nor.	Txy

Tablica 14. Poveznica naziva ograničenja za uzdužnjake između programa MARS2000 i programa DeMak

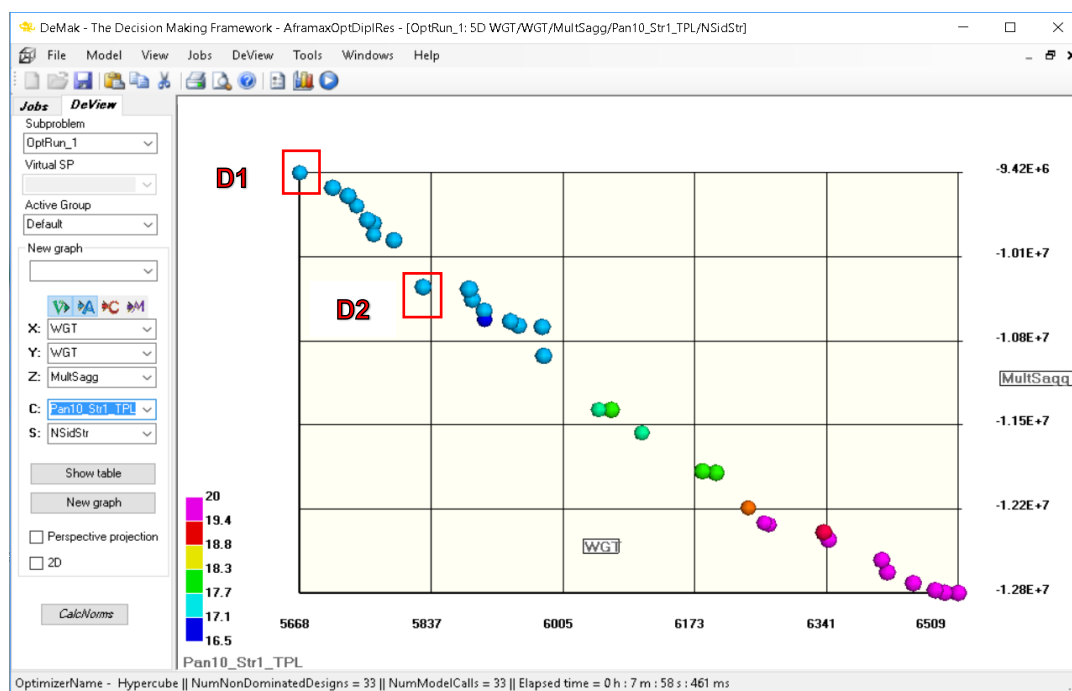
MARS2000	MarsOut	DeMak
Gross		
W	Gross W.	GrW
Tw Mini.	Gross Mini Thick.	GrMinT
Net		
W Load	Net Load W.	NetLW
W Test	Net Test W.	NetTestW
Shr Tw Load	Net Load Shr tw.	NetLShrTw
Shr Tw Test	Net Test Shr tw.	NetTestShrTw
Eta Bu. Over.	Eta Bu. Over.	BuckOver
Eta Bu. Sti.	Eta Bu. Sti.	BuckStf
Inertia Mini	Net Mini Inertia	NetMinIn
Tw Mini.	Net Mini Tweb	NetMinTw
Tfl Mini.	Net Mini Tflange	NetMinTf
BFI Mini.	Net Mini Bflange	NetMinBf
Fatigue Life	Fatigue Life	FatLife
HGS Bend.	Net Sig. Nor.	NetSx
	Net Sig. Comb.	NetSC

5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

5.1. Pareto fronta

Nakon provedenog postupka višeciljne optimizacije dobiveno je 33 nedominirana projekta. Sa Pareto fronte odabrana su dva projekta te su analizirana i uspoređena pomoću programa MARS2000. Obrazloženo je koji kriteriji/ ograničenja najznačajnije utječu na definiranje optimalnih strukturnih dimenzija pojedine projektne varijable.

Prvo je ispitan krajnji projekt na Pareto fronti, odnosno projekt s najboljom ostvarenom (minimalnom) masom (projekt D1). Taj projekt će se usporediti sa projektom kod kojeg se vidi značajno povećanje graničnog momenta savijanja, uz još uvijek prihvatljivu vrijednost mase (projekt D2). Na slici 26 prikazana je 2D Pareto fronta sa istaknutim dodatno analiziranim projektima.



Slika 26. 2D Pareto fronta nedominiranih rješenja

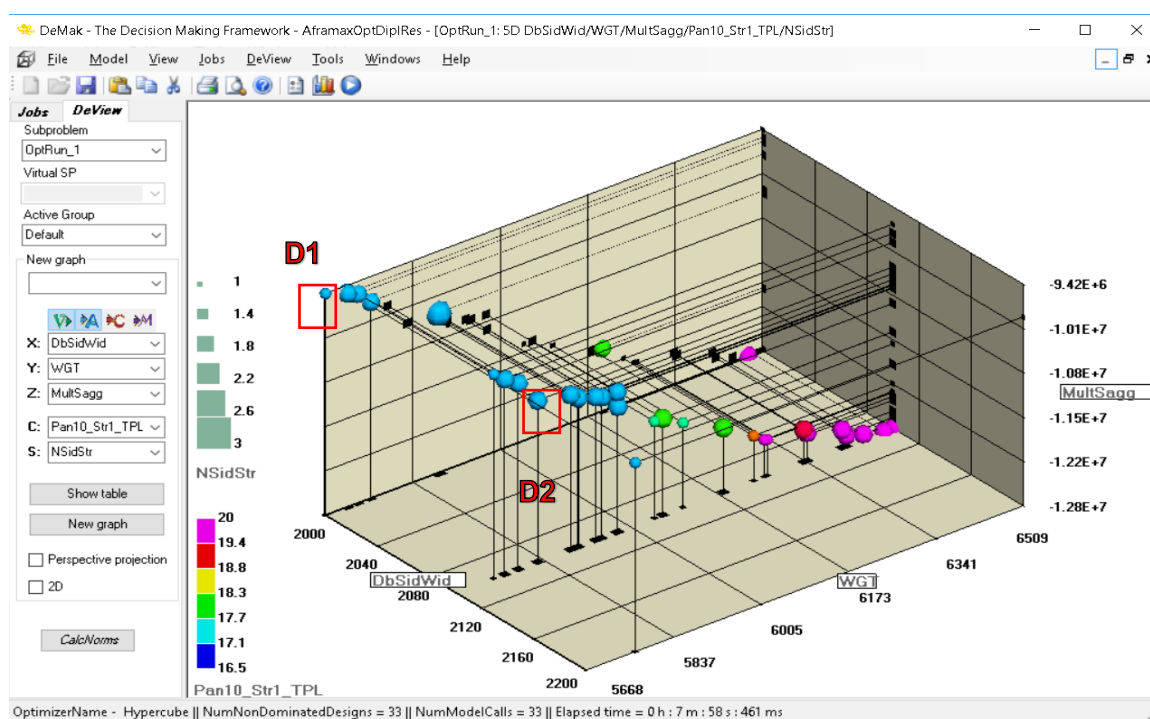
Pareto fronta na slici 26 proteže se između minimalne i maksimalne vrijednosti masa (WGT) i graničnog momenta savijanja za slučaj progiba (MultSagg). Također su na slici prikazane debljine lima (konkretno je prikazan lim palube, Pan10_Str1_TPL). U Tablici 15 prikazane su spomenute vrijednosti.

Tablica 15. Minimalne i maksimalne vrijednosti projekta sa pareto fronte prikazane na slici 26

	min.	max.
Masa [t]	5668	6509
Granični moment [kNm]	-12840000	-9420000
Debljina lima palube [t]	17	20

Sa Pareto fronte na slici 26 može se vidjeti da projekt D1 ima malu vrijednost debljine lima palube, što je za očekivati pošto se radi o projektu koji ima i najmanju masu. Ujedno, to je i projekt sa najmanjim graničnim momentom. Kod usporedbe dva dodatno analizirana projekta sa slike 26, vidi se da projekt D1 ima za 158 t manju masu (2.7 %) od projekta D2, te manji granični moment savijanja za 8.9 %.

Na slici 27 dan je 3D prikaz nedominiranih rješenja.



Slika 27. 3D prikaz nedominiranih rješenja

Prikazane su mase nedominiranih rješenja (os y), njihovi granični momenti savijanja (os z), debljine lima palube (boja), širine dvoboka (DbSidWid, os x) te broj proveza u dvoboku (NSidStr, veličina znakova). Broj proveza u boku prikazan je veličinom

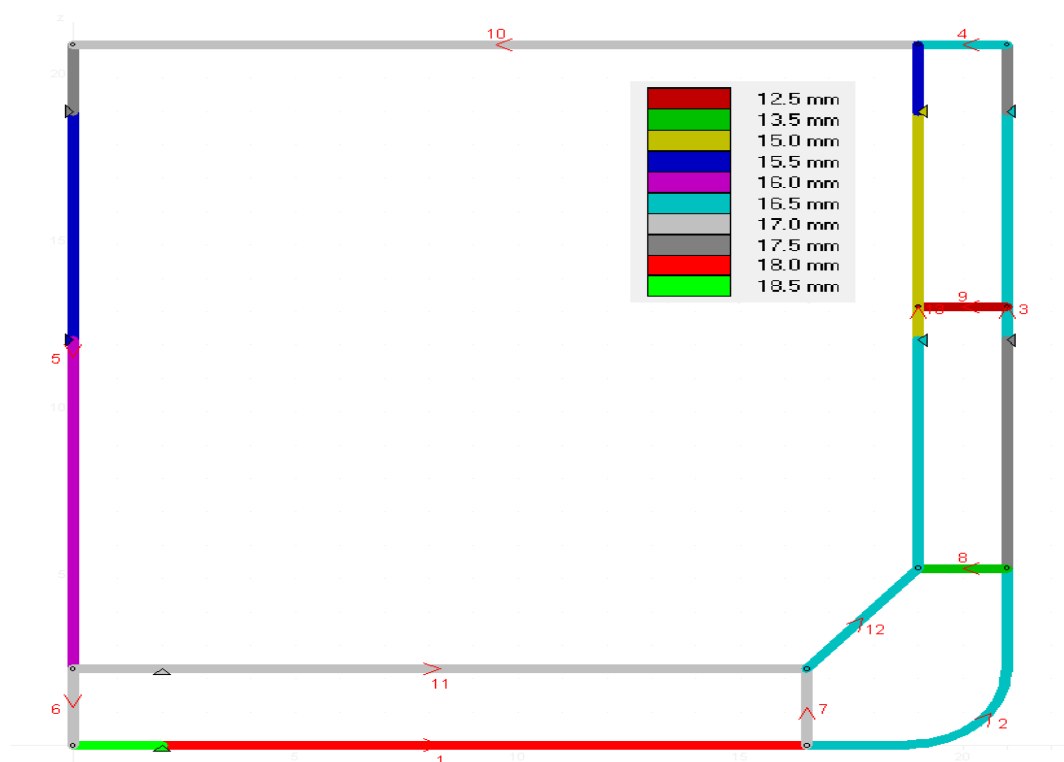
svakog projekta, odnosno jednu provezu imaju projekti najmanje veličine, dok tri proveze imaju projekti najveće veličine. Iz prikaza Pareto fronte se vidi da sa tri proveze u boku postoji samo jedno nedominirano rješenje. Kod 3D prikaza nedominiranih rješenja vidi se da je D1 projekt sa širinom dvoboka od 2000 mm i jednom provezom u boku. Projekt D2 ima širinu dvoboka 2100 mm i dvije proveze u boku.

Treba napomenuti da su svi nedominirani projekti oni sa razmakom okvira od 3400 mm. Projekti sa razmakom okvira od 3900 mm i 4500 mm su odbačeni, tj. nisu dio Pareto fronte. Mogući razlog za to je što je na tim projektima zamor (*Fatigue life*) dominantan kriterij podobnosti za ukrepe te je za zadovoljenje tog kriterija potrebno značajno povećati dimenzije ukrepe, što naravno rezultira s povećanjem mase.

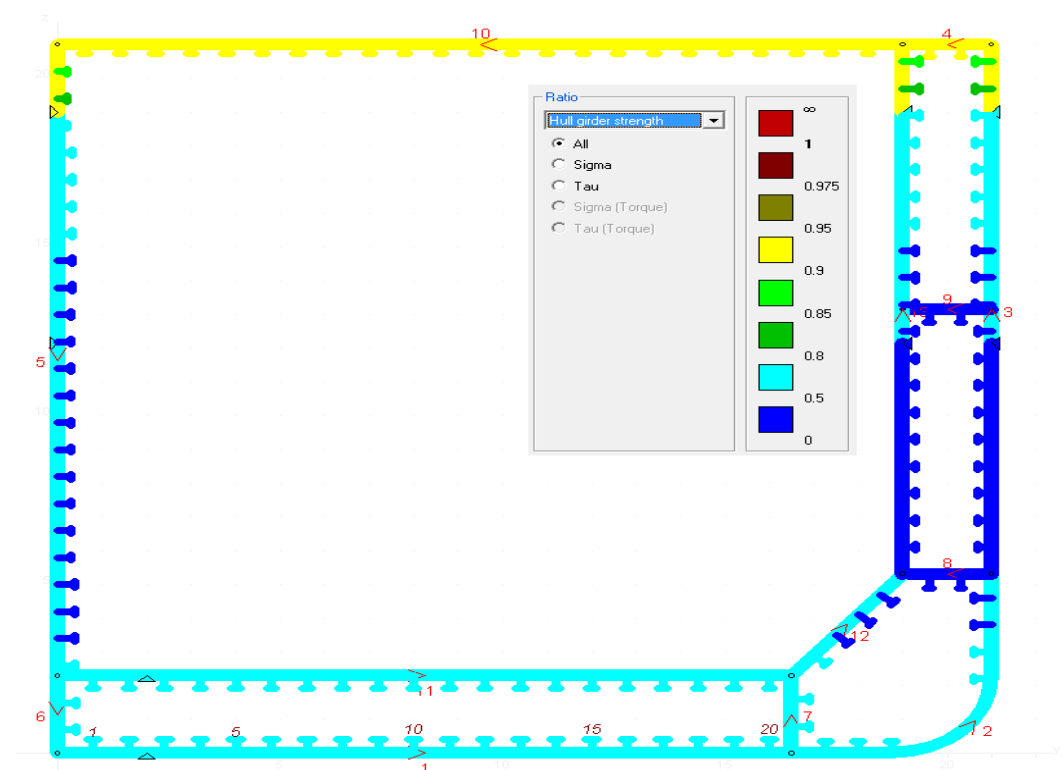
5.2. Analiza odabranih projekata s Pareto fronte

5.2.1. Projekt D1

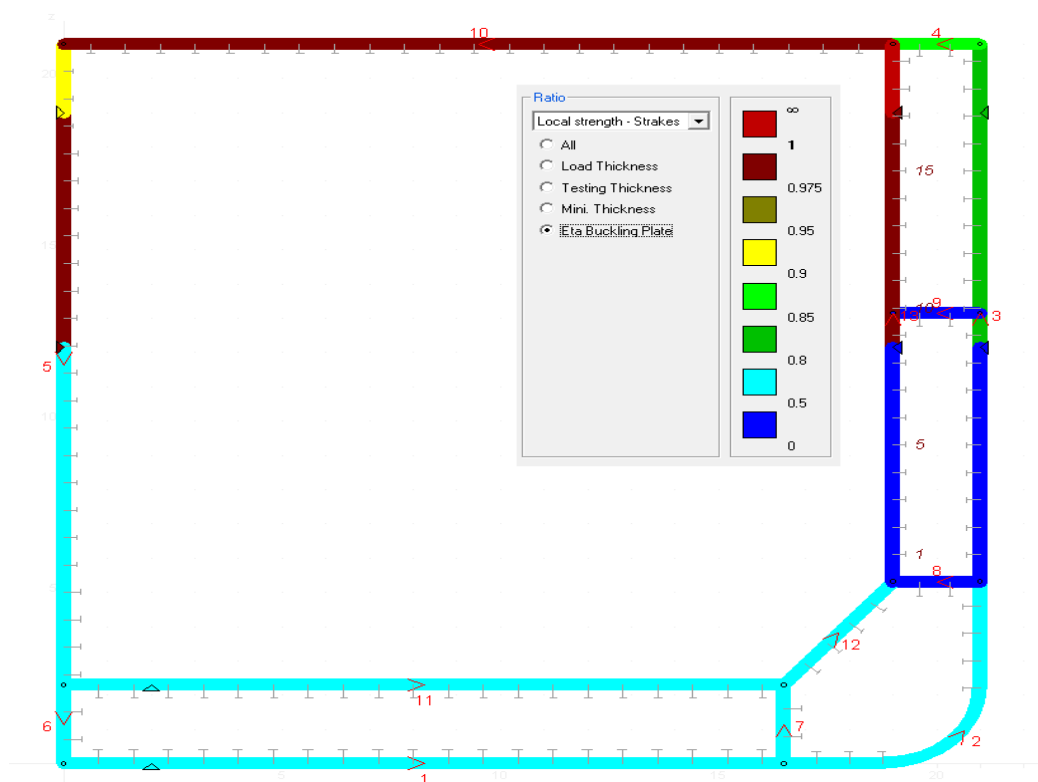
Na idućim slikama dani su prikazi najvažnijih karakteristika projekta D1. Redom se na slici 28, 29, 30 i 31 nalazi prikaz debljina lima, kriterija granične čvrstoće, kriterija izvijanja limova i prikaz kriterija zamora uzdužnjaka.



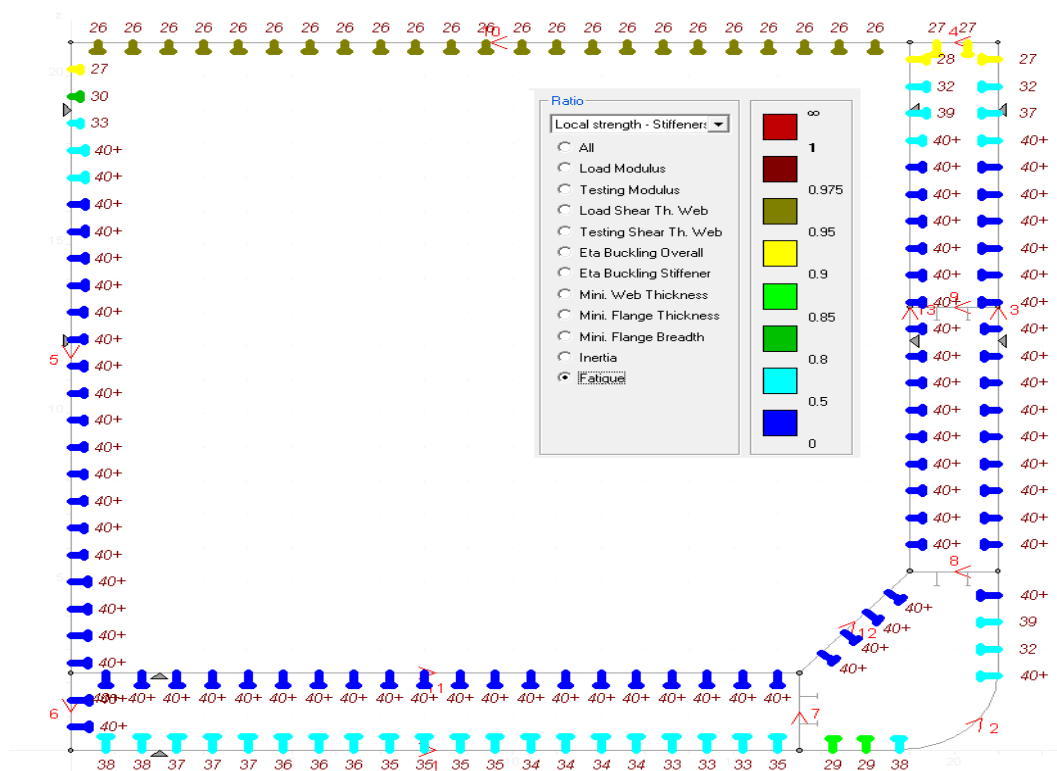
Slika 28. Prikaz debjina limova projekta D1



Slika 29. Prikaz kriterija granične čvrstoće projekta D1



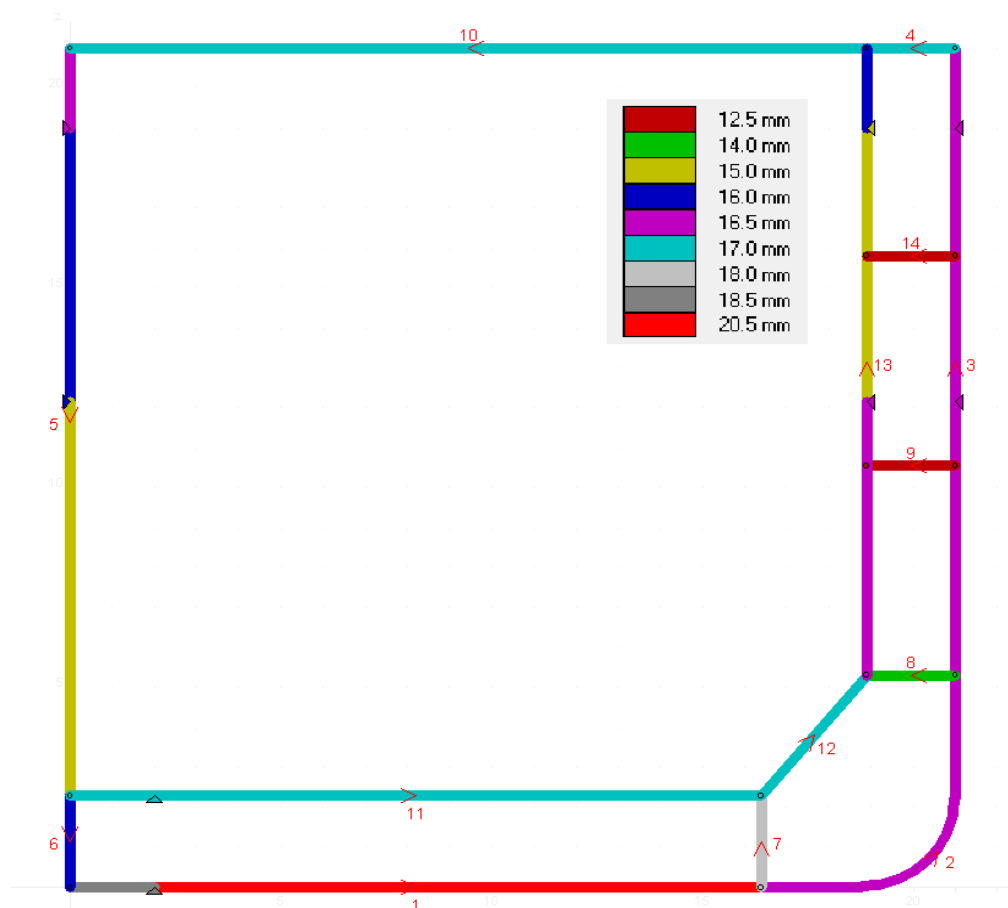
Slika 30. Prikaz kriterija izvijanja limova projekta D1



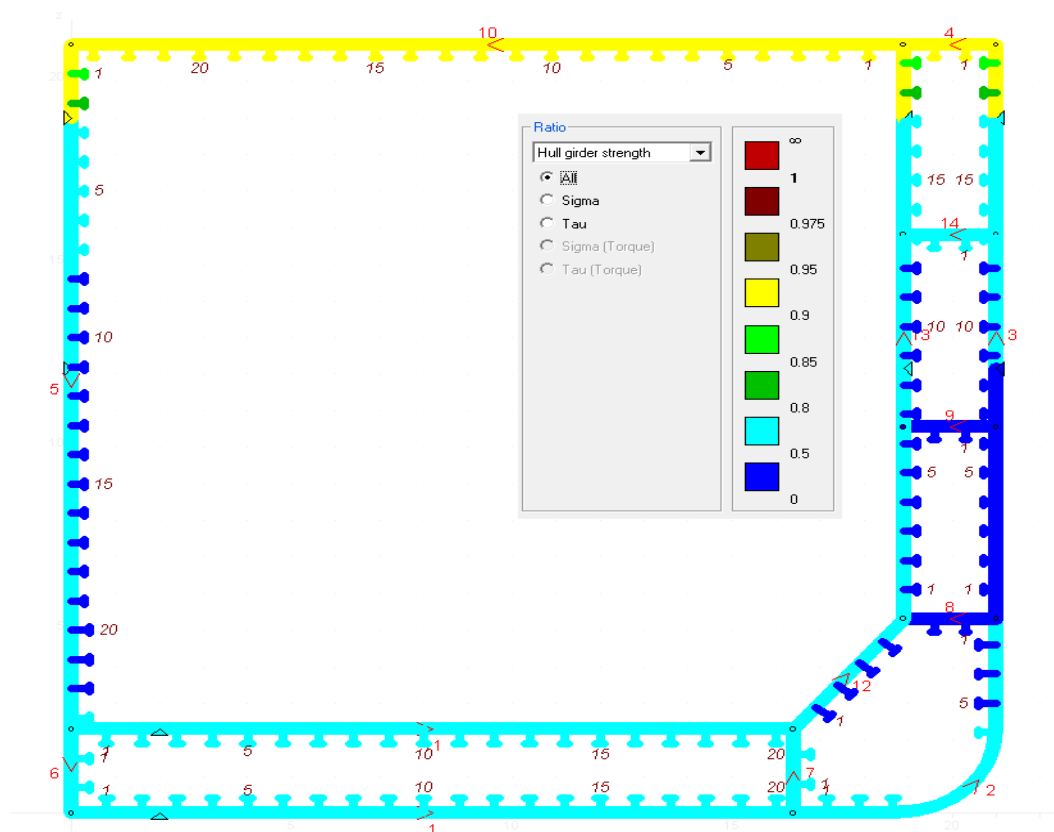
Slika 31. Prikaz kriterija zamora uzdužnjaka projekta D1

5.2.2. Projekt D2

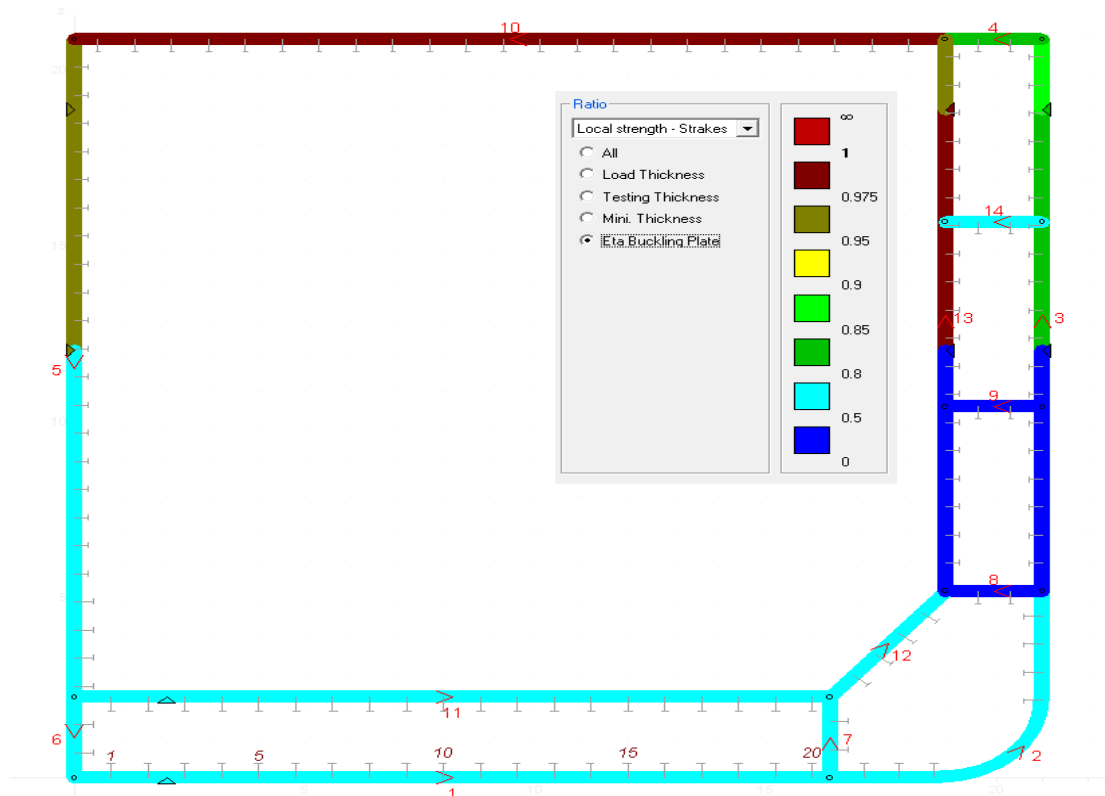
Na idućim slikama dani su prikazi najvažnijih karakteristika projekta D2. Redom se na slici 32, 33, 34 i 35 nalazi prikaz debljina lima, kriterija granične čvrstoće, kriterija izvijanja limova i prikaz kriterija zamora uzdužnjaka.



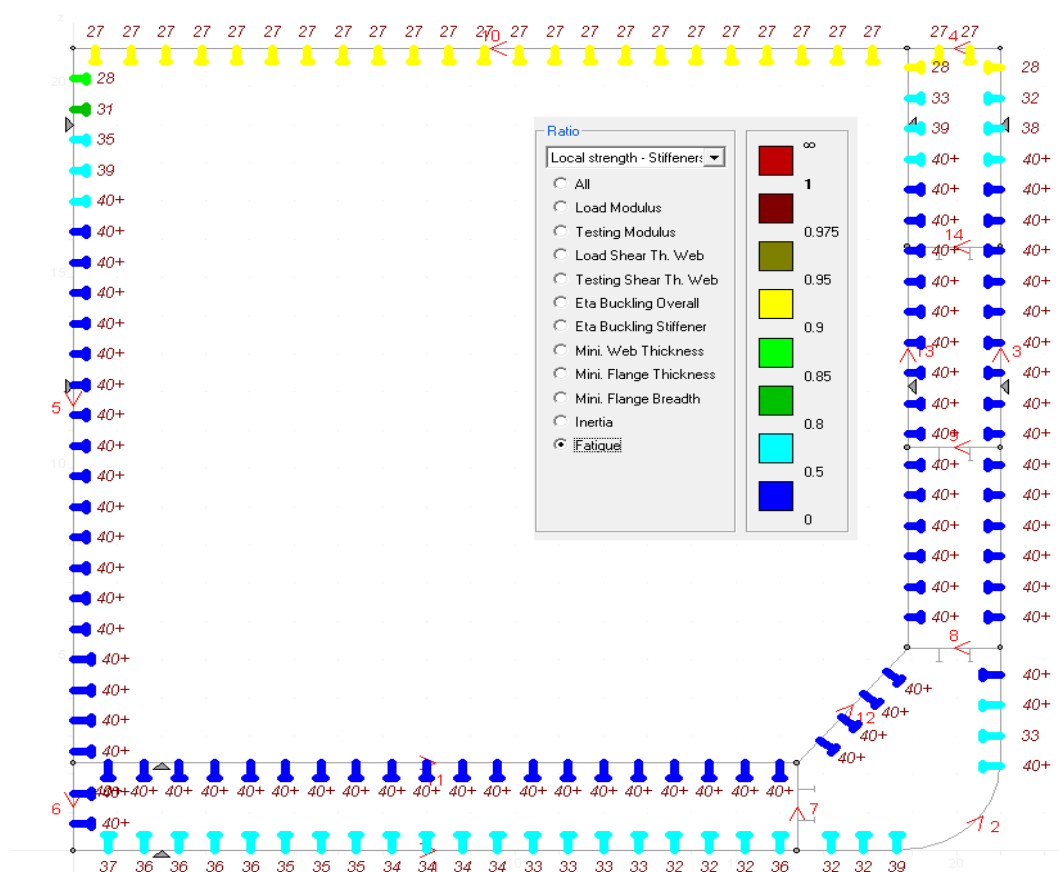
Slika 32. Prikaz debljina limova projekta D2



Slika 33. Prikaz kriterija granične čvrstoće projekta D2



Slika 34. Prikaz kriterija izvijanja limova projekta D2



Slika 35. Prikaz kriterija zamora uzdužnjaka projekta D2

5.3. Usporedba odabranih projekta sa Pareto fronte

Projekt D1 ima širinu dvoboka od 2000 mm i sadrži jednu provezu u dvoboku. Projekt D2 ima širinu dvoboka 2100 mm i dvije proveze u boku. Prikazom kriterija granične čvrstoće se vidi da je ona za oba modela prezadovoljena. Kod lokalne čvrstoće vidi se da kriterij izvijanja limova i kriterij zamora kod oba modela kritični za panele odnosno ukrepe.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena je višeciljna optimizacija konstrukcije glavnog rebra tankera za prijevoz nafte, s ciljem minimizacije mase i maksimizacije graničnog momenta. Za modeliranje i analizu projektnih varijanti korišten je program MARS2000. Ukupno je napravljeno 27 modela različitih topološko/ geometrijskih karakteristika.

Za višeciljnu optimizaciju korištena je programska aplikacija OCTOPUS DeMak. Prije pokretanja procesa optimizacije bilo je potrebno napraviti pripremu optimizacijskog modela, odnosno trebale su se povezati ulazno – izlazne datoteke programa MARS2000 sa programom DeMak.

Kao optimizacijski algoritam primijenjen je MOPSO Sigma. Optimizacijom su dobivena 33 nedominirana projektna rješenja. Sa Pareto fronte su odabrana dva projekta koja su detaljnije analizirana i uspoređena. Projekt s minimalnom masom i projekt na kojem se vidi povećanje graničnog momenta savijanja u slučaju progiba (u odnosu na projekt sa minimalnom masom) uz relativno malo povećanje mase. Odabrani projekti su uspoređeni korištenjem programa MARS2000.

Analizom rezultata je utvrđeno kako je granični moment savijanja za sva nedominirana rješenja prezadovoljen, odnosno da su lokalni kriteriji kritični (najčešće kriterij na izvijanje za panele te kriterij na zamor za ukrepe).

Daljnji rad na ovoj temi mogao bi obuhvatiti slijedeće:

- Uključivanje dodatnih kriterija koji trenutno nedostaju u optimizacijski problem (nakon izlaska nove verzije programa MARS2000)
- Implementaciju mogućnosti korištenja razmaka između ukrepa kao projektne varijable u okruženje Demak – Mars2000
- Provođenje višeciljne optimizacije s drugim optimizacijskim algoritmima kako bi se utvrdilo postoji li mogućnost pronalaska boljeg skupa nedominiranih rješenja od trenutno ostvarenog.

LITERATURA

- [1] IACS, Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, International association of classification societies, London, 2015.
- [2] Prebeg, P., „Višekriterijsko projektiranje složenih tankostijenih konstrukcija“, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [3] Andrić, J., „Projektiranje konstrukcije Ro-Ro i putničkih brodova“, Nastavni materijal, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [4] Andrić, J., „Metodologija konceptualnog projektiranja brodskih konstrukcija s interakcijom trup-nadgrađe“, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2007.
- [5] Žiha, K., Parunov, J., Tušek, B., „Granična čvrstoća brodskog trupa“, Brodogradnja, 2007, Vol.58, No.1, p. 29-41.
- [6] Prebeg, P., Rudan, S., Andrić, J., Parunov, J., „Structural Reliability of Damaged Oil Tanker in the Adriatic Sea“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [7] Kennedy, J., & Eberhard, R.C., "Particle swarm optimization. In Proceedings of IEEE international conference on neural networks", Piscataway, NJ, USA (pp. 1942-1948), 1995.
- [8] Važić, B., Posavec, D., Bingula, S., Pijaca, N. i Popović, S., „Implementacija Multiobjective Particle Swarm Optimization optimizacijskog algoritma u OCTOPUS DESIGNER“, Seminarski rad iz kolegija Osnivanje konstrukcije zrakoplova, FSB Zagreb, Hrvatska, 2008.